



**MARIA JOÃO
MOREIRA DIAS**

**Fiabilidade de centros de maquinação - um caso de
estudo**



**MARIA JOÃO
MOREIRA DIAS**

Fiabilidade de centros de maquinaria - um caso de estudo

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Matemática e Aplicações com especialização em Estatística e Investigação Operacional, realizado sob a orientação científica da Doutora Adelaide de Fátima Baptista Valente Freitas, Professora Auxiliar do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro.

Dedico aos meus pais, irmãs e meu namorado.

o júri

presidente

Prof. Dr. Agostinho Miguel Mendes Agra
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dra. Adelaide de Fátima Baptista Valente Freitas
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dra. Helena Maria Pereira Pinto Dourado e Alvelos
Professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço à Dra. Adelaide Freitas a incansável ajuda durante a realização deste trabalho, pela sua completa disponibilidade, cooperação e apoio tanto a nível académico como pessoal.

Ao Dr. Agostinho Agra por toda a ajuda e incentivo à realização deste estágio. À Renault CACIA, S.A., em particular ao Engenheiro Constantino Pinto que me recebeu nesta instituição, me orientou e se disponibilizou para ajudar na realização deste trabalho, facultando toda a informação e condições necessárias à realização deste estágio, bem como por todos os conselhos oferecidos. Também aos engenheiros Cláudio Seabra e Luís Figueiredo por toda a colaboração e boa disposição proporcionada, facilitando a realização do trabalho.

Aos meus pais por terem tornado a minha formação académica possível, e ao meu namorado por todo o apoio e companheirismo.

palavras-chave

Fiabilidade, manutenção, análise de regressão, metodologia loess, trajetórias de processos estocásticos.

resumo

O grau de fiabilidade dos equipamentos de uma empresa é de extrema importância na avaliação do seu funcionamento e melhoria de produtividade. Neste trabalho são exploradas metodologias estatísticas no estudo da fiabilidade de 19 máquinas pertencentes a uma unidade elementar de trabalho da fábrica Renault C.A.C.I.A.. O principal objetivo é providenciar um instrumento de análise gráfica da influência do plano de manutenção preventiva na fiabilidade e, conseqüentemente, sugerir melhores práticas de intervenção preventiva. O tempo médio sem intervenção de um equipamento é considerado como indicador da fiabilidade. A regressão localmente ponderada é proposta para estimar, graficamente, a curva de ajustamento do tempo médio sem intervenção entre preventivas. Adicionalmente, é proposta a análise de trajetórias do processo estocástico $\{R(t), t > 0\}$, onde $R(t)$ representa a razão entre o número de intervenções preventivas ocorridas num intervalo de tempo de amplitude t e o número de intervenções (preventivas e corretivas) ocorridas nesse mesmo intervalo de tempo. As trajetórias permitem visualizar a evolução, ao longo do tempo, da percentagem de intervenções preventivas e, por complementaridade, da percentagem de intervenções corretivas. A aplicação destas técnicas permitem tecer diversas recomendações e considerações sobre o plano de manutenção das 19 máquinas analisadas.

keywords

Reliability, maintenance, regression, methodology loess, trajectories of stochastic processes.

abstract

The degree of reliability of a company equipment is extremely important in evaluating its operation and improvement of productivity. In this work, statistical methods are explored in the study of reliability of 19 machines belonging to an elementary unit of work of factory Renault C.A.C.I.A. . The main objective is to provide a tool for graphical analysis of the influence of the preventive maintenance plan in the reliability and therefore suggest best practices for preventive intervention. The average time without the intervention of a machine is considered as an indicator of reliability. The locally weighted regression is proposed to estimate graphically the curve adjustment of mean time between preventive intervention. Additionally, it is proposed trajectory analysis of the stochastic process $\{R(t), t > 0\}$, where $R(t)$ represents the ratio between the number of preventive interventions occurred in a time span t and the number of interventions (preventive and corrective) which occurred in that time interval. The trajectories allow to visualize the evolution, over time, the percentage of preventive interventions, and for complementarily in the percentage of corrective interventions.

The application of these techniques allow us to make a number of recommendations and considerations for the maintenance plan of the 19 analyzed machines.

Índice

Capítulo I: Introdução.....	1
1.1 Empresa acolhedora	1
1.1.1 História e Cultura da Renault	2
1.2 Objetivo do Estágio	6
1.3 Estrutura do relatório	7
Capítulo II: Fiabilidade e Manutenção.....	11
2.1 Fiabilidade.....	11
2.2 Fiabilidade Humana.....	13
2.3 Definições	14
2.4 Indicadores da Fiabilidade	16
2.4.1 Tempo Médio para a Falha.....	17
2.4.2 Taxa de Falha.....	18
2.4.3 Tempo Médio entre Manutenções.....	18
2.5 Leis Estatísticas usadas em Fiabilidade	19
2.5.1 Distribuições Contínuas	21
2.5.2 Distribuições Discretas.....	24
2.6 Manutenção.....	26
2.6.1 Importância da Manutenção	27
2.6.2 Objetivos da Manutenção	28
2.6.3 Histórico da Manutenção.....	29
2.6.4 Manutenção Corretiva	31
2.6.5 Manutenção Preventiva.....	31

Capítulo III: Metodologia Loess e Trajetórias de Processos Estocásticos	37
3.1 Modelo de Regressão Linear Simples	38
3.2 Método Loess	39
3.2.1 O parâmetro de suavização.....	41
3.2.2 Grau do polinômio local.....	42
3.2.3 Função de ponderação.....	43
3.2.4 Vantagens e desvantagens do método <i>loess</i>	45
3.3 Validação Cruzada	46
3.4 Adequação do método	46
3.5 Trajetórias de um processo estocástico.....	48
Capítulo IV: Aplicação prática dos métodos.....	51
4.1 Interpretação do gráfico da Regressão Localmente Ponderada ...	52
4.2 Interpretação do gráfico de trajetórias	57
4.3 Análise de resultados detalhada para 3 máquinas.....	63
4.4 Análise de resultados para as restantes máquinas	78
4.4.1 Análise a máquinas que maquinam bombas de óleo	78
4.4.2 Análise às máquinas que maquinam suporte de injetores.....	85
4.4.3 Análise às máquinas que maquinam coletores	94
4.5 Avaliação geral e sugestões	102
4.6 Considerações finais	106
Bibliografia e Webgrafia	107
Anexos	109

Índice de Figuras

Figura 1: Fábrica Renault C.A.C.I.A.	1
Figura 2: Tanques FT-17 do exército americano.	3
Figura 3: Modelo Renault pilotado por Fernando Alonso em 2005, primeiro ano em que o grupo Renault venceu o campeonato de Fórmula 1.	5
Figura 4: Gráfico da função taxa de falha, conhecido por Curva da Banheira.	16
Figura 5: Função de distribuição e função de fiabilidade quando os tempos de falha seguem uma distribuição normal.	23
Figura 6: Triângulo da sobrevivência.	27
Figura 7: Esquema da manutenção preventiva sistemática.	33
Figura 8: Esquema da manutenção preventiva condicionada.	35
Figura 9: Estimativas de regressão local para polinómios de diferente grau e mesmo parâmetro de suavização.	43
Figura 10: Curva <i>loess</i> (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº2102 quando se analisa o tempo médio sem intervenções entre preventivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.	54
Figura 11: Curva <i>loess</i> (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº 2102, quando se analisa os tempos sem intervenções entre preventivas consecutivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.	56
Figura 12: Gráfico da trajetória da razão entre o número de intervenções preventivas e o número de intervenções preventivas e de prioridade zero ao longo do tempo t (em dias) para a máquina nº 2123.	60

Figura 13: Curva <i>loess</i> (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº 2102, quando se analisa os tempos sem intervenções entre preventivas consecutivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.....	64
Figura 14: Gráfico de barras do tempo entre intervenções corretivas..	65
Figura 15: Gráfico de barras do tempo entre intervenções preventivas.	66
Figura 16: Gráficos das trajetória do processo $R(t)$	67
Figura 17: Curva <i>loess</i> (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº 2109, quando se analisam os tempos sem intervenções entre preventivas consecutivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.....	70
Figura 18: Gráfico de barras do tempo entre intervenções corretivas..	71
Figura 19: Gráfico de barras do tempo entre intervenções preventivas.	72
Figura 20: Gráficos da trajetória do processo $R(t)$	73
Figura 21: Curva <i>loess</i> (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº 2123, quando se analisa os tempos sem intervenções entre preventivas consecutivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.....	74
Figura 22: Gráfico de barras do tempo entre intervenções corretivas..	75
Figura 23: Gráfico de barras do tempo entre intervenções preventivas.	75
Figura 24: Gráfico da trajetória do processo $R(t)$	76
Figura 25: Gráfico da curva <i>loess</i> e gráfico da trajetória do processo $R(t)$	78
Figura 26: Gráfico da curva <i>loess</i> e gráfico da trajetória do processo $R(t)$	79

Figura 27: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	81
Figura 28: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	82
Figura 29: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	84
Figura 30: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	85
Figura 31: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	87
Figura 32: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	88
Figura 33: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	89
Figura 34: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	91
Figura 35: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	92
Figura 36: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	94
Figura 37: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	96
Figura 38: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	97
Figura 39: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	98
Figura 40: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.	100

Índice de Tabelas

Tabela 1: Ilustração da construção dos pares ordenados (tempo entre preventivas consecutivas, tempo médio sem intervenções).	53
Tabela 2: Ilustração da construção dos pares ordenados (tempo entre preventivas consecutivas, tempo sem intervenções).....	55

Índice de Anexos

Anexo I: Script da aplicação do método de Validação Cruzada para a escolha do parâmetro de suavização	110
Anexo II: Gráfico de resíduos e qqnorm para o ajustamento da curva loess à máquina nº 2102 e comandos para as suas construções.	111
Anexo III: Script usado para a construção da curva loess para a máquina nº 2102.....	112
Anexo IV: Scripts usados para a obtenção dos gráficos de barras para a máquina nº 2102.....	113
Anexo V: Script usado para a construção do gráfico da trajetória do processo $R(t)$ para a máquina nº 2102.	114
Anexo VI: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2112.....	115
Anexo VII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2113.....	116
Anexo VIII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2115.....	117
Anexo IX: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2119.....	118
Anexo X: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2223.....	119
Anexo XI: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2101.....	120
Anexo XII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2114.....	121
Anexo XIII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2249.....	122

Anexo XIV: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2219.....	123
Anexo XV: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2220.....	124
Anexo XVI: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2250.....	125
Anexo XVII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2116.....	126
Anexo XVIII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2222.....	127
Anexo XIX: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2221.....	128
Anexo XX: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2227.....	129
Anexo XXI: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2117.....	130

Lista de Abreviaturas e Siglas

AT - Available Time

C.A.C.I.A. - Companhia Aveirense de Componentes para
Indústria Automóvel

IPQ - Instituto Português da Qualidade

MDT - Mean of Down Time

MST - Mean Response Time

MTBF - Mean Time Between Failures

MTBM - Mean Time Between Maintenance

MTTF - Mean Time To Failure

MTTM - Mean Time To Maintenance

NCAP - New Car Assessment Programme

ONG - Organização Não Governamental

RCM - Reliability Centered Maintenance

UET - Unidade Elementar de Trabalho

UTAC - Union Technique de l'Automobile du motorcycle et du Cycle

Capítulo I: Introdução

O relatório de estágio que se apresenta culmina o estágio curricular realizado no período de 28 de Janeiro a 26 de Julho de 2013 e proposto no âmbito do plano de estudos do segundo e último ano do curso de Mestrado em Matemática e Aplicações com especialização em Estatística e Investigação Operacional, lecionado na Universidade de Aveiro (UA).

Neste relatório são sistematizados os estudos desenvolvidos e suas conclusões sobre a Fiabilidade de Centros de Maquinação GROB da empresa acolhedora, a Renault C.A.C.I.A..

1.1 Empresa acolhedora

A Renault C.A.C.I.A. (Companhia Aveirense de Componentes para a Indústria Automóvel, S.A.) é uma fábrica do grupo Renault que produz órgãos e componentes para a indústria automóvel desde 1981. A fábrica situa-se em Cacia, Aveiro.



Figura 1: Fábrica Renault C.A.C.I.A..

Imagem obtida de <http://www.renault.pt/descubra-a-renault/cacia/>

Com uma superfície de cerca de 300 000 m² e uma área coberta de 70 000 m², a Renault C.A.C.I.A. dispõe de mais de um milhar de colaboradores nas mais variadas áreas de funcionamento. A sua estrutura em “U” facilita o esquema de distribuição de fluxos, pessoas e equipamentos.

Em 2012, a Renault C.A.C.I.A. teve uma produção de caixas de velocidades superior a 500 000 unidades e conseguiu uma faturação de aproximadamente 268 milhões de euros exportando todos os seus produtos para fábricas de montagem de veículos e de mecânica Renault e Nissan situadas em países como a Espanha, a França, a Roménia, a Turquia, a Eslovénia, o Brasil, o Chile, Marrocos, a África do Sul, o Irão e a Índia.

No presente, a fábrica produz caixas de velocidades e alguns componentes para motores, nomeadamente, bombas de óleo, árvores de equilibragem, coletores, balanceiros, entre outros componentes, em ferro fundido e alumínio. E detém de meios de controlo de qualidade e ensaios bastante sofisticados.

Como enriquecimento cultural associado a este relatório, fez-se uma breve pesquisa na internet sobre o percurso histórico do grupo Renault. Com base nessa pesquisa, apresenta-se a seguir uma síntese de acontecimentos marcantes do grupo Renault até aos dias de hoje.

1.1.1 História e Cultura da Renault

O grupo Renault foi fundado em 1898 pelo francês Louis Renault, seus irmãos Marcel e Fernand e seus amigos Thomas Evert e Julian Wyer, que foram os primeiros na indústria automobilística e responsáveis pela introdução do Taylorismo como forma de organização do trabalho em França. O Taylorismo é uma teoria organizacional que propõe como deve ser gerida uma organização para que ela seja o mais eficaz e eficiente possível. O Taylorismo privilegia ciclos de trabalho curtos e

repetitivos, sequências de trabalho detalhadas e a separação entre concepção e execução. Taylor defendia que a racionalização tornaria o trabalho menos árduo, mais produtivo e mais proveitoso. A sua teoria provocou um aumento exponencial da produtividade levando a um desenvolvimento na economia, Miguel Pina e Cunha *et al* (2007).

Os irmãos rapidamente chegaram ao sucesso nas primeiras corridas de cidade-a-cidade em França. Louis e Marcel Renault competiam com modelos da sua fábrica, no entanto Marcel faleceu num acidente durante uma corrida de Paris a Madrid em 1903. A partir daí, Louis não mais competiu mas a sua empresa continuou envolvida em competições incluindo a vitória de um Renault modelo AK 90 e vencendo também o *Grand Prix* em 1906. Em 1909 falece Fernand Renault, e Louis Renault toma o controle total do grupo.

No período de 1914 a 1918, durante a Primeira Guerra Mundial, a Renault fabricou munições, aviões militares e veículos como o tanque de guerra Renault FT-17, e Louis foi até homenageado pelo seu contributo com os veículos militares. Fabricou depois veículos especiais para táxi e tornou-se líder de mercado na França.



Figura 2: Tanques FT-17 do exército americano.
Imagem obtida da Wikipédia.

Entre guerras, a Renault alargou a sua produção a máquinas agrícolas e industriais. Com o enorme número de encomendas que se sucederam, a Renault teve alguns problemas com stocks e mão-de-obra e também na distribuição de seus veículos. Foi aí que se aliou, em 1920, a um empresário francês rico que ajudou a empresa a fazer as distribuições pelo país, Gustave Gueudet. Nesse mesmo ano a Renault chegou a produzir mais de quarenta e cinco mil de sete modelos de carros. Em 1928 a empresa começa a exportar para o Reino Unido.

Surge a primeira linha de montagem em 1929 e em 1945 nacionalizou-se e tornou-se na “Régie Nationale des Usines Renault”, que posteriormente moderniza as fábricas para tentar conquistar o mercado americano. Os sucessos começam a surgir com o 4 CV e depois com o Dauphine, o Renault 4, o Renault 5, etc.

O crescimento da marca mantém-se até aos anos 80 e entra na Fórmula 1. Contudo entra em grandes prejuízos e implementa uma drástica política de redução de custos e foca-se na sua atividade principal, recuperando os seus lucros em 1987.

Em 1996 a Renault privatiza-se e em 1999 entra na capital da Nissan. A Renault torna-se o construtor europeu mais rentável em 2009 quando é implementado o plano Renault Contrato 2009, e em 2011 lança os primeiros veículos elétricos: Kangoo Z.E. e Fluence Z.E., depois o Twizy e o ZOE, em 2012.

Atualmente, apesar do governo francês ser detentor de quase 16% da empresa, a Renault é uma empresa privada. Louis Schweitzer foi o executivo-chefe da Renault entre 1992 e 2005, sendo substituído pelo brasileiro Carlos Ghosn que ainda hoje se mantém neste cargo.

A Renault participa em cerca de 65% do capital da fabricante japonesa de automóveis Nissan e juntas formam a *Renault-Nissan Alliance* desde 1999. Existem também outras participações da Renault noutros grupos fabris. Como, por exemplo, na Samsung Motors (Coreia do Sul), na Volvo Trucks (Suécia) e na Dacia (Roménia).

Relativamente a competições desportivas de carros, a Renault tem mostrado a sua participação. Entre 1977 e 1985, a Renault competiu como equipa na Fórmula 1 ausentando-se da mesma em 1989 continuando a participar como fornecedora de motores, tendo sido fornecedora de motores às vitoriosas equipas Williams e Benetton. Em 2002 retornou à Fórmula 1 como equipa, sendo bicampeã do mundial de construtores em 2005 e 2006 e fazendo o piloto Fernando Alonso bicampeão mundial de pilotos nesse mesmo ano. Em 2010 a equipa contratou novos pilotos mas sem grande sucesso, e em 2011 a equipa passou a designar-se por Lotus Renault depois de o grupo Genni Capital vender a sua parte de participação na equipa para o grupo Lotus. Em 2012 a equipa passa a chamar-se apenas de Lotus segurando o piloto francês Romain Grosjean e tendo como retorno o conhecido piloto campeão finlandês Kimi Raikkonen. Na atual temporada, ainda em andamento, Romain Grosjean e Kimi Raikkonen compõe a *Lotus F1 Team* e ambos pilotam um modelo *Lotus E21* criado pela *Lotus F1*. Romain Grosjean situa-se no 8º lugar da competição, enquanto que Raikkonen se encontra na 4º posição da mesma.



Figura 3: Modelo Renault pilotado por Fernando Alonso em 2005, primeiro ano em que o grupo Renault venceu o campeonato de Fórmula 1.

Imagem obtida de Wikipédia.

1.2 Objetivo do Estágio

É importante destacar que este é o primeiro estágio na Renault C.A.C.I.A. de um estudante do curso de mestrado em Matemática e Aplicações da Universidade de Aveiro. Em reuniões preliminares à realização do estágio estabeleceu-se que um dos objetivos de trabalho poderia ser a análise da fiabilidade de um conjunto de equipamentos existentes em várias unidades elementares de trabalho (UET's) daquela unidade fabril, em função do plano de ações de manutenção preventiva executado.

A inovação e a enorme competitividade que as empresas conhecem nos dias de hoje são determinantes na procura da constante melhoria das suas atividades e na prestação dos seus serviços. Em empresas como a Renault C.A.C.I.A., que detém um avançado processo de maquinação¹ e montagem de componentes mecânicos com elevada precisão, é de extrema importância que os seus equipamentos funcionem da forma mais correta possível, sem paragens inesperadas ou avarias. Neste sentido, a caracterização da fiabilidade dos equipamentos, considerando o plano de ações de manutenção preventiva aplicado, é um instrumento de avaliação indispensável.

Com a integração da estagiária na empresa e na dinâmica dos processos de fabricação, os objetivos do estágio começaram a tornar-se mais claros, tendo-se estabelecido os seguintes objetivos concretos de investigação:

- analisar as intervenções preventivas e corretivas realizadas no período de 2009 a 2012 de 19 das 21 máquinas da marca GROB existentes nas unidades elementares de trabalho (UET's) da Renault C.A.C.I.A., uma

¹ maquinação - processo de trabalhar as peças em bruto.

vez que para duas dessas máquinas não se dispõe de dados suficientes para realizar o estudo.

- fornecer uma ferramenta que permita avaliar a qualidade de funcionamento, em média, dos equipamentos daqueles Centros de Maquinação.
- sugerir recomendações para o plano de manutenções preventivas das máquinas GROB.

Neste relatório são abordadas e aplicadas técnicas estatísticas adequadas à análise do comportamento da fiabilidade das 19 máquinas pertencentes aos centros de maquinação de marca GROB posicionadas no departamento de componentes mecânicos da unidade fabril Renault C.A.C.I.A.. Com o propósito de estabelecer um instrumento (prático) que permita identificar melhores planos preventivos a serem aplicados a cada um dos centros de maquinação, sugere-se a utilização da regressão localmente ponderada (*loess*) para estimar a curva de ajustamento de relações de interesse para a abordagem do problema, como por exemplo, relacionar o tempo médio sem intervenções corretivas entre duas intervenções preventivas consecutivas, com o tempo entre intervenções do tipo preventivo. Para a construção dessa ferramenta, recorreu-se ao *software* estatístico R (versão 3.0.1) de acesso livre (<http://www.r-project.org/>).

1.3 Estrutura do relatório

Este relatório é composto por cinco capítulos, sendo este o primeiro e onde é feita uma breve apresentação da empresa Renault C.A.C.I.A. onde foi desenvolvido o estágio e é dada a conhecer parte da história da Renault. São relatados também os objetivos concretos propostos pela empresa para este estágio e referenciada a metodologia de base que aqui se sugere para alcançar esses mesmos objetivos.

Nos dois capítulos seguintes, capítulos 2 e 3, dão lugar os desenvolvimentos teóricos para o presente estudo. No capítulo 2, são apresentadas algumas noções e definições básicas associadas ao conceito de fiabilidade, definição chave deste relatório. Serão explicados os níveis de fiabilidade (desejados) e destacada a diversidade de indicadores para a fiabilidade. No capítulo 3 estará presente a técnica estatística principal proposta para a realização dos objetivos do estudo, seus fundamentos teóricos e a base da justificação da escolha dos seus parâmetros. Mais concretamente, será feito um enquadramento teórico sobre a metodologia *loess*, apresentado o método de validação cruzada, que auxilia na escolha do parâmetro de suavização da curva de ajustamento, e uma breve abordagem ao conceito de trajetórias de processos.

No quarto capítulo será aplicada a ferramenta *loess* a diversos gráficos, para investigar e avaliar de que modo as intervenções preventivas em cada centro de maquinação estão a influenciar a fiabilidade de cada um desses centros, equacionar a existência de eventuais erros cometidos nos tempos de intervenção e assim obter melhorias na fiabilidade desses centros de maquinação. No capítulo 4 será também introduzida uma breve explanação de como devem ser interpretadas as representações gráficas construídas com o apoio do *software* estatístico 'R' de forma a que todo o indivíduo que tenha acesso a este relatório possa, sem ter grandes conhecimentos estatísticos, decifrar o que os vários gráficos representam em termos do bom ou menos bom funcionamento de cada máquina.

Por fim, serão ditadas algumas conclusões sobre o estado de ação da máquina no que diz respeito à sua fiabilidade, e também serão recomendados alguns outros planos de prevenção para algumas das máquinas para as quais se tenham obtido resultados menos satisfatórios no que diz respeito ao seu bom funcionamento. Estas recomendações são feitas pela estagiária, que organizou, tratou e observou todos os dados recolhidos e serão feitas apenas com base na sua experiência e intuição relativa à observação e estudo das

ferramentas estatísticas. Cabe portanto à empresa, mais propriamente aos chefes da área da manutenção, julgar, crer e implementar estas recomendações.

No quinto e último capítulo serão apresentadas conclusões gerais sobre o trabalho realizado durante o estágio.

Capítulo II: Fiabilidade e Manutenção

Em geral, um equipamento é constituído por vários componentes. Logo, a fiabilidade do equipamento irá depender da fiabilidade de cada um dos seus componentes. A fiabilidade de um equipamento é determinada nas fases de conceção e de utilização. A qualidade dos materiais e dos processos de conceção são determinantes na primeira fase, enquanto que na fase de utilização, só substituindo componentes por outros mais fiáveis ou criando redundâncias se consegue aumentar a fiabilidade do equipamento.

2.1 Fiabilidade

A fiabilidade de um equipamento no instante t é definida como a probabilidade de o equipamento funcionar sem falhas, em certo ambiente (condições climáticas, instalação, tipo de utilizador, recursos de manutenção disponíveis, pó, químicos, etc.) e durante um certo período de tempo de t unidades (Assis, 2004). É portanto a probabilidade de "funcionar como o previsto" e exprime o grau de confiança que se pode depositar na ação do equipamento, sendo este fiável se "se puder confiar nele". A função fiabilidade representa-se por 'R' (do inglês, *Reliability*).

Sendo a fiabilidade uma probabilidade, conhecer o valor da fiabilidade de um equipamento não garante que durante um determinado intervalo de tempo ele não vá ser alvo de falhas.

Conhecer a fiabilidade de um equipamento permite obter o número de avarias que, em média, acontecerão num certo período de tempo. Por exemplo, afirmar que a probabilidade de um equipamento funcionar sem falhas em 1000 horas é de 0.75, isto é $R(1000) = 0.75$, significa dizer que esse equipamento é capaz de funcionar, em média, durante

750 horas sem que existam falhas e o número de avarias esperado em 1000 horas é de $\frac{1000}{750} = \frac{4}{3}$.

De acordo com as suas fontes, podem definir-se dois tipos diferentes de fiabilidade (Serrano, 2009):

- Fiabilidade intrínseca. Os fabricantes fazem testes normalizados que determinam a fiabilidade do equipamento, sendo que os resultados são independentes da aplicação num contexto real. Esta fiabilidade resulta da qualidade intrínseca do projeto.
- Fiabilidade extrínseca. Fiabilidade que é determinada pela experiência dos utilizadores no manuseamento do equipamento (ou podem estes fornecer os dados ao fabricante que os tratará estatisticamente). Aqui os resultados obtidos dependem apenas da aplicação real. Este tipo de fiabilidade é bastante importante na prática, pois trata-se de uma média obtida a partir de um grande número de aplicações diferentes e durante um longo período de tempo.

A fiabilidade decresce com o tempo, na medida em que quanto maior for o tempo de operação da máquina, maior se torna a probabilidade de esta falhar. O tempo de operação nem sempre é avaliado em unidades de tempo. Pode ser avaliado em distância percorrida, ou ciclos de operação, número de peças produzidas ou ainda uma combinação destas.

Existem normas para a estimação da fiabilidade. A MIL-STD 217 e a TELCORDIA/BELLCORE SR-332 são muito utilizadas em componentes eletrónicos. A norma PRISM do *Reliability Analysis Center* disponibiliza dados sobre fiabilidade de componentes eletrónicos e não eletrónicos, e a norma NSWC-98/LE1 HDBK disponibiliza dados sobre fiabilidade de componentes mecânicos.

Se se seguir o princípio de que qualquer equipamento deve funcionar em condições que proporcionem segurança, economia de meios e com a

maior eficácia, então é necessário admitir três etapas na fiabilidade: medir, melhorar e otimizar. Na primeira etapa é essencial deduzir a expressão da fiabilidade adequada a cada tipo de órgão e investigar o seu resultado. Na seguinte etapa é necessário procurar formas mais adequadas que conduzam à melhoria da fiabilidade global quando todas as interdependências da fiabilidade do órgão forem entendidas. Essas formas podem ser: reduzir ao mínimo a complexidade, aumentar a fiabilidade dos componentes, introduzir componentes redundantes e estabelecer rotinas de manutenção preventiva. Para maximizar a fiabilidade do equipamento, consideram-se como adquiridos um determinado peso, volume, custo e disponibilidade ou, inversamente, tendo definido um grau de fiabilidade, tenta-se otimizar estas restrições. No trabalho desenvolvido no estágio na Renault C.A.C.I.A. foram realizadas as duas primeiras etapas. Na primeira etapa, durante o estágio, investigaram-se formas possíveis de definir uma expressão para a fiabilidade de cada uma das máquinas alvo do estudo. Na segunda etapa, durante a elaboração do presente relatório, analisaram-se os resultados e as conclusões daí resultantes com vista a estabelecer sugestões de planos de prevenção.

2.2 Fiabilidade Humana

Quando se fala na fiabilidade de um sistema, é importante ter em conta o papel que o Homem desempenha na interação com os equipamentos. O termo "fiabilidade humana" é descrito, de forma frequente, como uma disciplina que procura estabelecer a probabilidade de que uma pessoa não falhe no cumprimento de uma tarefa (ação) requerida num ambiente de trabalho, independentemente das ferramentas utilizadas e durante um certo período de tempo (Pallerosi, 2008).

O seu princípio básico baseia-se no facto de não existirem pessoas à prova de falhas. Contrariamente ao que acontece com os equipamentos

que se degradam ao longo do tempo, a fiabilidade humana está influenciada por determinados factores como, a aptidão (inata), a aprendizagem na realização da tarefa, a experiência, a competência das pessoas e até falhas relacionadas com a natural diminuição das capacidades das pessoas ao longo do tempo.

2.3 Definições

Denota-se por T uma variável aleatória que representa o tempo em funcionamento, sem falha, de um equipamento. Esta quantidade aleatória T pode ser discreta (por exemplo, T = número de dias sem falhas) ou contínua. Representa-se por $F(t)$ a função de distribuição de T e por $f(t)$ a função de probabilidade, no caso discreto, ou função densidade de probabilidade, no caso contínuo, de T .

Assim, em termos formais, define-se fiabilidade como sendo a função R dada por:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t).$$

Na análise da fiabilidade, a função F representa a função de distribuição da falha.

No caso de T ser uma variável aleatória discreta (com valores em \mathbb{N}_0), define-se:

- A probabilidade de falha no instante t : $P(T = t)$ = probabilidade de ocorrência de falha no instante t .
- A função taxa de falha no instante t : $\lambda(t) = P(T = t | T > t - 1) = \frac{P(T=t)}{P(T>t-1)} = \frac{f(t)}{R(t-1)}$ = probabilidade de ocorrer falha no instante t sabendo que até ao instante anterior o equipamento funcionou sem falhas.

No caso de T ser uma variável aleatória contínua, define-se analogamente:

- A função densidade de falha no instante t : $f(t)$, sendo $f(t) = F'(t)$.
- A função taxa (instantânea) de falha: $\lambda(t) =$ probabilidade condicional de falha no instante $t = f_{T|T>1}(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$.

Perante uma situação real onde o modelo de fiabilidade é desconhecido, a probabilidade que determina o valor da fiabilidade de um equipamento, é estimada pela frequência relativa. Concretamente, seja $N_s(t)$ o número de componentes em funcionamento (índice s de sobreviventes (equipamentos que não falham)) no instante t e N_0 o número de componentes iniciais, o valor da função de fiabilidade pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0}.$$

Pode-se falar também na probabilidade de falha, $F(t)$, definindo-a como sendo $1 - R(t)$ e estimada por:

$$F(t) = \frac{N_0 - N_s(t)}{N_0}.$$

A função taxa de falha tem um desenho gráfico designado por Curva de Mortalidade, sendo usualmente chamado de "Curva da Banheira" devido ao seu aspeto em 'U' (Figura 4). Nesta curva é possível observar três períodos de vida diferentes de um equipamento, sendo eles: a vida infantil, a vida útil e o envelhecimento. A zona I corresponde ao tempo inicial de funcionamento de um equipamento novo que, quando colocado em serviço, apresenta uma elevada taxa de falha devido à existência de defeitos de fabrico, ou controlo de qualidade defeituosa,

ou também a instalação incorreta do equipamento. Neste período a análise de fiabilidade não é tão importante como nos outros períodos. Na zona II, durante o período de vida útil de um equipamento, a taxa de falhas é aproximadamente constante pois não depende do tempo. Na última fase, zona III, o número de falhas começa a aumentar rapidamente devido a factores como o desgaste do equipamento, corrosão, fadiga... Em alguns casos podem reduzir-se estas falhas recorrendo a um plano de manutenção preventivo.

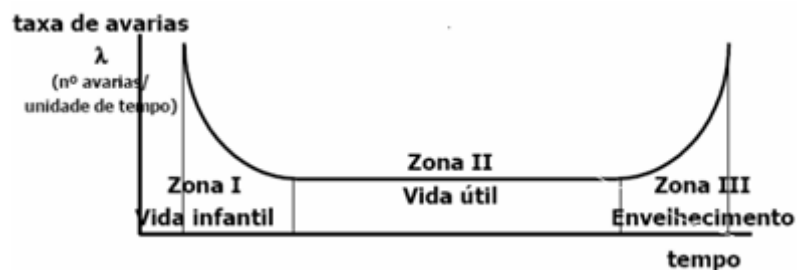


Figura 4: Gráfico da função taxa de falha, conhecido por Curva da Banheira.

Imagem obtida de <https://woc.uc.pt/dem/getFile.do?tipo=2&id=5021>.

Estão assim definidos os principais parâmetros de fiabilidade, a função (densidade) de probabilidade de falha, a função de distribuição de falha e a função taxa (instantânea) de falhas.

2.4 Indicadores da Fiabilidade

A fiabilidade é definida como uma probabilidade e este conceito pode tornar-se confuso para os vários elementos de uma equipa de manutenção. Então, normalmente recorre-se a índices de mais fácil compreensão para que seja possível avaliar a fiabilidade.

Existem vários indicadores de fiabilidade de um equipamento (Assis, 2004). De seguida apenas são descritos três indicadores: tempo médio

para a falha, taxa de falha e tempo médio entre manutenções. Existem ainda outros indicadores como, por exemplo, a longevidade, a disponibilidade, a vida média e a vida média para a primeira falha. No entanto, estes últimos não serão aqui apresentados pelo facto de não terem grande relevância no contexto do trabalho.

2.4.1 Tempo Médio para a Falha

Se se dispuser de informação sobre os tempos entre falhas, pode-se calcular o tempo médio para a falha (*MTTF*, *Mean Time to Failure*). Este é calculado pela seguinte expressão:

$$MTTF = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N},$$

onde t_i é o tempo que decorre entre falhas consecutivas, isto é, o tempo decorrido desde que o equipamento é colocado em funcionamento até que volte a falhar novamente, e N é o número de avarias do equipamento.

O *MTTF* (*Mean Time To Failure*) é um indicador que fornece apenas uma ideia da fiabilidade de um equipamento. Deduz-se que quanto mais elevado for o *MTTF* de um equipamento, maior será a sua fiabilidade durante o período em que a taxa de falha é constante.

A expressão acima representa um tempo médio e a sua interpretação está dependente do que representam as quantidades observadas t_i . Assim, por exemplo, a expressão pode ser designada por *MTBF* (*Mean Time Between Failure*), sendo necessário ter em conta a diferença entre os dois conceitos, *MTTF* e *MTBF*. O *MTTF* aplica-se em casos em que os componentes dos equipamentos não são reparáveis, ou seja, vão sendo substituídos por componentes novos à medida que vão avariando, como é o caso de lâmpadas, rolamentos, entre outros. O *MTBF* é usado nos

casos em que os componentes onde ocorrem falhas são componentes que podem ser reparados para voltarem a ser usados.

2.4.2 Taxa de Falha

A taxa de falha representa a chance de um equipamento ou sistema falhar na próxima e menor unidade de tempo, sabendo que até então funcionava.

A taxa de falha por vezes é crescente, ou decrescente, ou constante ou até nenhuma das anteriores. É crescente quando há maior desgaste e velhice do equipamento, e é decrescente aquando do início do uso do equipamento. No entanto, durante a vida útil de um equipamento, a taxa de falha é aproximadamente constante pois não depende do tempo, e aqui designa-se apenas por taxa de falha λ . Neste caso pode-se afirmar que $\lambda = \frac{1}{MTTF}$, (Assis, 2004).

2.4.3 Tempo Médio entre Manutenções

O tempo médio entre manutenções, usualmente representado por *MTBM* (*Mean Time Between Maintenance*), representa o tempo médio decorrido entre manutenções corretivas consecutivas, isto é, é a média dos tempos decorridos entre o fim de uma manutenção corretiva originada por uma falha e o início de outra manutenção corretiva proveniente de uma outra avaria. Aplica-se aos casos em que os equipamentos têm a possibilidade de voltar a funcionar por reparação de um ou mais componentes.

Um *MTBM* elevado significa que, em média, o tempo entre avarias é elevado pelo que, nessas circunstâncias, espera-se que o equipamento apresente elevada fiabilidade.

2.5 Leis Estatísticas usadas em Fiabilidade

Leis estatísticas de fiabilidade são modelos teóricos estimados com recurso ao conhecimento de situações passadas de uma entidade (componente, equipamento ou sistemas) para inferir sobre a condição dessa entidade no futuro. Essa inferência pode ser feita com base numa distribuição conhecida já ajustada aos dados ou através do cálculo de uma função própria que caracterize a fiabilidade prevista (como por exemplo, o *MTTF*). Situações como o tipo de entidade (ser mecânico, eletrónico, etc), se é um equipamento reparável ou não podem ser uma mais-valia na escolha de um modelo paramétrico para a fiabilidade.

Com base numa amostra de tempos de falha, pode-se estimar qual a forma (aproximada) da função de distribuição da falha, $F(t)$. Para a estimação dessa curva pode usar-se o método da regressão ou o método da máxima verosimilhança.

Ainda a partir da amostra, é possível investigar o ajustamento de uma função teórica aos dados recorrendo a testes de ajustamento (Qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov, Andersen-Darling, entre outros), admitindo um determinado nível de significância.

Para testar a normalidade dos dados pode-se construir um gráfico qqnorm e aplicar-se testes como o de Shapiro-Wilk ou o de Anderson-Darling para averiguar a existência de normalidade, e assim complementar uma interpretação gráfica (Assis, 2004).

As hipóteses a testar em cada um destes dois testes são as seguintes:

$$\begin{cases} H_0: a \text{ amostra tem distribuição Normal} \\ H_1: a \text{ amostra não tem distribuição Normal} \end{cases}$$

Assumindo um nível de significância de 5%, isto é, $\alpha = 0.05$, a hipótese H_0 será rejeitada se o valor-p apresentado pelos testes for inferior ao valor de α .

Teste de Shapiro-Wilk

Este teste determina uma estatística de teste (W) calculada sobre os valores amostrais ordenados elevados ao quadrado, tentando avaliar se uma determinada amostra aleatória é oriunda de uma distribuição normal. Devido ao elevado poder que tem demonstrado, este método tem sido adotado preferencialmente nos testes de normalidade.

A estatística de teste é dada pela seguinte expressão:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} ,$$

onde b é uma constante calculada com apoio dos dados e de uma certa tabela (não apresentada aqui) e \bar{x} é a média dos n valores da amostra.

Teste de Anderson-Darling

Este teste pode ser usado para averiguar se uma amostra aleatória provém de uma distribuição normal. É uma modificação do teste de Kolmogorov-Smirnov mas que atribui uma maior importância às caudas da distribuição. Este teste tem a vantagem de ser um teste mais sensível. (Stephens, 1974).

Esta metodologia será aplicada no capítulo IV, para investigar a normalidade em modelos de regressão.

No tema fiabilidade, as distribuições contínuas são mais destacadas na literatura especializada do que as distribuições discretas. Porém, os tempos de falhas registados para o presente trabalho correspondem a número de dias, pelo que as distribuições de maior interesse aqui são as distribuições discretas. Assim, de seguida, apresenta-se uma síntese das distribuições contínuas e discretas mais abordadas na análise da fiabilidade (Lingeron, 1979; Assis, 2004).

2.5.1 Distribuições Contínuas

As distribuições contínuas que geralmente se aplicam na fiabilidade são: exponencial, exponencial negativa, log-normal, Weibull, normal, normal truncada, gama, gaussiana inversa e beta. A seguir irá apenas debruçar-se sobre as mais comuns: Weibull, exponencial, normal e log-normal.

Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull deve o seu nome ao apelido do físico sueco Waloddi Weibull. Este utilizou-a para representar a tensão de rutura de materiais.

Esta distribuição é largamente usada na engenharia por causa da sua versatilidade, sobretudo na descrição de fenómenos de vida de componentes elementares de sistemas, ao longo de todo o seu ciclo de vida. É também adequada para descrever fenómenos de vida em situações de corrosão, fadiga e desgaste.

A função de distribuição de uma variável aleatória T (tempo de falhas) com distribuição de Weibull é a seguinte:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha},$$

onde t representa o tempo, ciclos de funcionamento ou qualquer outra medida que represente o tempo de vida, α é o parâmetro de forma que traduz o mecanismo de degradação, e β é o parâmetro de escala que corresponde à vida característica.

A função de fiabilidade correspondente é assim dada por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}.$$

Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é um caso particular da Weibull quando $\alpha = 1$. É a distribuição mais usada em fiabilidade eletrónica para descrever o período no qual a taxa de falhas é considerada constante. É adequada também à representação de falhas que ocorrem de forma inesperada ou ao acaso. Pode ser usada no caso de sistemas.

Neste caso, a função densidade probabilidade de falha é dada por,

$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ e a função de distribuição é $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, onde t é o tempo de funcionamento do equipamento e λ é a taxa média de falhas (constante).

A correspondente função de fiabilidade é a seguinte:

$$R(t) = e^{-\lambda t}.$$

Uma taxa constante de falhas significa que, após o equipamento ter sido posto em uso, a sua probabilidade de falha não se altera, ou seja, nesta lei de falhas, não há um efeito de degradação.

Distribuição Normal

Embora esta distribuição seja das mais antigas e das mais usadas na estatística, ela não é das mais importantes leis de falha. Tem-se mostrado apropriada para equipamentos em que as falhas se devem a efeitos de maior desgaste, pois descreve bem o comportamento de falha de um equipamento à medida que a degradação se vai tornando mais intensa (Assis, 2004).

A função densidade de probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

em que μ é o valor da média e σ é o desvio padrão.

Na função de Weibull, quando $\alpha > 1$, a função taxa instantânea de falhas, $\lambda(t)$, é crescente e a função densidade probabilidade de falha, $f(t)$, aproxima-se de uma distribuição normal, a qual é conseguida quando α varia entre 2.6 e 3.7. A Figura 5 apresenta um esboço da função de distribuição e da função de fiabilidade. Como esperado, $F(t)$ é crescente ao longo do tempo, enquanto que a função de fiabilidade é decrescente.

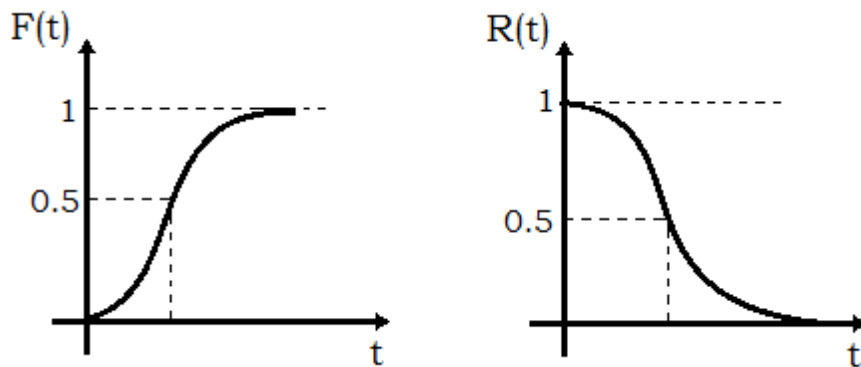


Figura 5: Função de distribuição e função de fiabilidade quando os tempos de falha seguem uma distribuição normal.

Distribuição Log-normal

A distribuição log-normal é adequada para modelar situações em que se verificam grandes diferenças na duração de eventos e uma grande concentração de durações curtas numa primeira fase. É o caso de ações de reparação as quais, na sua maioria, são executadas dentro de tempos padrão mas, ocasionalmente, correm mal e os tempos disparam. Aplica-se sempre que se constata que os logaritmos naturais dos tempos de vida, $\ln(t)$, se distribuem segundo uma normal.

A função densidade de probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_Y t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(t) - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}},$$

onde μ_Y é a média dos logaritmos naturais dos tempos e σ_Y é o desvio padrão dos logaritmos naturais dos tempos.

Se μ_X é a média dos tempos entre falhas (MTTF) e σ_X o desvio padrão dos mesmos, estes podem ser deduzidos a partir daqueles através das seguintes expressões:

$$\mu_X = MTTF = e^{\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}} \quad e \quad \sigma_X = e^{2\mu_Y + \sigma_Y^2} \times (e^{\sigma_Y^2} - 1).$$

2.5.2 Distribuições Discretas

Distribuição Geométrica

Sabe-se que a distribuição geométrica é o análogo discreto da distribuição exponencial e pode representar:

- o número de insucessos que antecedem o primeiro sucesso numa sucessão de provas de *Bernoulli* independentes e identicamente distribuídas, tomando neste caso valores 0, 1, ...; ou então
- o número total de provas de *Bernoulli* independentes e identicamente distribuídas realizadas até que ocorra o primeiro sucesso, tomando neste caso os valores 1, 2, ...

Por vezes a distribuição geométrica é designada por distribuição discreta do tempo de espera para o primeiro sucesso. No contexto presente, o sucesso representa uma falha.

Seja T o número total de inspeções até se registar uma falha. A variável aleatória T possui distribuição geométrica se e só se a sua função de probabilidade é dada por:

$$P(T = m) = (1 - p)^{m-1}p, m \in \mathbb{N},$$

onde p representa a probabilidade de ocorrência de falha.

Esta distribuição possui função taxa de falha constante e goza da seguinte propriedade:

$$P(T \geq m_1 + m_2 | T \geq m_1) = P(T \geq m_2).$$

Esta propriedade, conhecida por falta de memória, significa que se sabe que foram realizadas pelo menos m_1 inspeções para o registo da primeira falha, a probabilidade de ainda vir a efetuar-se pelo menos mais m_2 inspeções para a primeira falha é exatamente igual à probabilidade de se efetuar pelo menos m_2 inspeções até ao registo da primeira falha (i.e., esquece o que se observou nas primeiras m_1 inspeções).

Distribuição Binomial Negativa

A distribuição binomial negativa é por vezes designada de distribuição discreta do tempo de espera pelo r – ésimo sucesso, e trata-se de uma generalização da distribuição geométrica.

Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é usada na contagem do número de falhas que ocorrem de forma independente num período de tempo fixo. Isto é, uma falha num futuro próximo não depende da ocorrência ou da não ocorrência de falhas num passado recente.

Esta contagem poderá tratar-se do número de visitas mensais a uma oficina por parte de uma frota de veículos. À partida não há limite superior para o número de falhas.

A variável aleatória $Poisson(\theta)$ possui função de probabilidade dada por:

$$P(T = k) = e^{-\theta} \frac{\theta^k}{k!}, k \in \mathbb{N}_0.$$

2.6 Manutenção

Estabelecendo uma correspondência entre o Homem e a máquina pode-se afirmar que a manutenção é a "medicina das máquinas". Na vida humana podem ser identificadas três fases distintas em que cada uma delas é marcada por uma quantidade e variedade de doenças: a infância, a adolescência e fase adulta, e a fase geriátrica. Na fase da infância são várias as "pequenas" doenças que se identificam relacionadas com um ainda organismo sensível e com a falta de proteção natural (anticorpos) que vai sendo adquirida ao longo da infância. De forma análoga, no período de vida infantil de uma máquina, as avarias encontram-se em grande número e que posteriormente diminui devido a algumas ações de correção. Assim como na vida adolescente/adulta, o período de vida útil da máquina é o que menos regista falhas, as quais vão acontecendo aleatoriamente. Na fase de envelhecimento da máquina, correspondente à idade idosa do humano, as falhas são cada vez em maior número e até a intensificação de correções parece não resolver, da mesma forma, essas falhas.

As ações aplicadas às "doenças" das máquinas são denominadas então de manutenção das mesmas e integram um conjunto de atividades desenvolvidas em todo o ciclo de vida de um equipamento e que tem por objetivo manter ou repor a sua funcionalidade com as melhores condições possíveis de custo, disponibilidade e segurança (Filipe, 2003).

2.6.1 Importância da Manutenção

A enorme competitividade nos meios de produção do mundo empresarial, a concorrência e os objetivos económicos obrigam à procura de um nível de excelência e perfeição cada vez maior, com preferência nos baixos custos e na maior rapidez. Por estes motivos, cada empresa tenta destacar-se otimizando os vértices do que em gestão empresarial se designa por "triângulo da sobrevivência" (Figura 6). Esta otimização assenta na eliminação de desperdícios e das disfunções melhorando, em paralelo, a produtividade e a eficiência. O "triângulo da sobrevivência" toma como essencial à sobrevivência de uma empresa, o produto/serviço prestado pela mesma e os seus vértices apontam para o mercado/cliente através das variáveis "qualidade", "preço" e "prazo de entrega". No meio de tantas outras funções, a manutenção tem impacto direto nestas variáveis (Filipe, 2003).



Figura 6: Triângulo da sobrevivência.

Imagem obtida de Filipe (2003).

A manutenção tem um importante papel no desenvolvimento empresarial que pode ser justificado analisando aspetos económicos, legais e sociais. Em termos económicos, reduzir desperdícios, rejeições e reclamações sobre os produtos/serviços, evitar atrasos ou paragens da produção, diminuir os consumos e aproveitar melhor os recursos humanos são formas de maximizar os rendimentos e prolongar a vida útil dos equipamentos.

Na vertente legal, a importância da manutenção engloba atitudes de prevenção como a insegurança, o incómodo (ruído, fumo ou odores), a poluição (gases tóxicos, descargas líquidas e resíduos), etc.

Socialmente, sendo estas medidas não obrigatórias, elas podem contribuir para o melhoramento da imagem de uma empresa (Filipe, 2003).

2.6.2 Objetivos da Manutenção

Qualquer empresa pretende manter a sua produção e o seu nível de serviço o mais elevado possível, ao mesmo tempo que maximiza os seus lucros. Para tal é necessário adotar práticas de gestão que possam conduzir até essa meta. A manutenção dos seus equipamentos é uma dessas imensas práticas envolvidas nos planos de obtenção de excelência.

O objetivo básico de qualquer setor de manutenção é garantir que, qualquer equipamento sob sua responsabilidade, se encontre num patamar em que seja capaz de executar a função para ele programada e manter-se nesse patamar o maior tempo possível.

Embora este seja o objetivo primordial desta prática, as linhas de orientação da manutenção devem reger-se pelos seguintes objetivos (Filipe, 2003):

- Segurança: Aspeto indispensável que envolve a segurança de todos os intervenientes no processo (pessoas, equipamentos, comunidade e utentes);
- Qualidade: Aqui o pretendido é alcançar o melhor rendimento dos equipamentos, com o mínimo de defeitos e o máximo respeito pelas condições de higiene e segurança e pelo meio ambiente;
- Custo: Qualquer intervenção de manutenção deve tornar-se o menos dispendioso possível avaliando os custos de produção, dos custos oriundos da manutenção ou da não manutenção;
- Disponibilidade: Tenta-se manter a regularidade da produção e cumprimento dos prazos garantindo a maior operacionalidade dos equipamentos, encontrando uma frequência de imobilizações ajustada e reduzindo as paragens dos equipamentos devido a avarias.

É evidente que o ótimo seria conseguir realizar planos de manutenção que conseguissem satisfazer todos estes objetivos, mas condicionantes de vária ordem limitam a conjugação dos mesmos. Realizar um plano de manutenção ótimo é um desafio constante para os profissionais da manutenção (Filipe, 2003).

É importante também referir que os serviços de manutenção não são apenas da responsabilidade do pessoal da manutenção, mas também de todos os operadores, auxiliares, e responsáveis de uma forma direta ou indireta pelas máquinas e equipamentos.

2.6.3 Histórico da Manutenção

Após a 1ª guerra mundial, quando a indústria foi forçada a atingir padrões mais elevados de produção, assiste-se a uma mudança de atitude no que diz respeito às reparações. Assim, começaram a existir

equipas especializadas, dependentes da produção. Esta situação manteve-se até aos anos 30.

A produção em massa, que se verificava a partir desta altura, e a necessidade de ter os equipamentos num nível de disponibilidade muito grande durante a 2ª guerra mundial levou a que as empresas se preocupassem mais em corrigir as falhas mas também a tentar evitá-las através de substituições sistemáticas. E assim estava definida a manutenção até aos anos 80.

A partir do fim da 2ª grande guerra são criadas nas empresas estruturas próprias da manutenção, sem dependência direta da produção. Começa a surgir uma nova disciplina, a Engenharia da Manutenção, que se baseia na aplicação de modelos matemáticos e estatísticos para análise e controlo da fiabilidade. Posteriormente aos anos 80, com os avanços da tecnologia, foi permitido a oferta e diversificação de instrumentos digitais de grande precisão e assim passam-se a medir os parâmetros de funcionamento, a avaliar a sua variação e a extrapolar o momento da avaria, levando ao diagnóstico antecipado das mesmas. Nesta fase a substituição sistemática começa a dar lugar à substituição condicionada, para que parte dos elementos fossem substituídos de acordo com o seu estado de condição, levando a custos de exploração mais reduzidos.

A manutenção é aplicada de acordo com a necessidade do equipamento e/ou da empresa para repor o seu funcionamento ou para evitar que este seja afetado. Por isso, e dependendo da necessidade no momento, podem ser aplicadas diferentes intervenções de manutenção. A manutenção envolve custos monetários e de tempo para que seja eficaz, e estes são recursos cada vez mais preciosos em qualquer empresa. Portanto, é necessário geri-los da melhor forma e, na manutenção, gerem-se estes recursos avaliando quais os equipamentos que justificam o seu uso. A maior parte das empresas ou faz submanutenção, em que predominam as intervenções corretivas, ou sobremanutenção, realizando um elevado número de intervenções

preventivas. Nos dois casos consomem-se mais estes recursos do que o desejado (Assis, 2004).

2.6.4 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva consiste apenas em corrigir avarias quando estas acontecem aleatoriamente no tempo, com o objetivo de recolocar a máquina em funcionamento o mais rápido possível. É, portanto, uma manutenção não periódica que trata danos atuais e não iminentes. Infelizmente é o tipo de manutenção mais comum, cara e prejudicial. É prejudicial para os equipamentos e produção, uma vez que o tempo em que a máquina está avariada esta pode não se encontrar a produzir, implicando assim custos de perda de produção e custos de reparação. Os maiores custos associados a este tipo de manutenção são: o alto custo de *stocks* de peças sobressalentes, custos com o trabalho extra e, em alguns casos, o longo período de tempo em que a máquina está sem exercer as suas funções (baixa disponibilidade). É também o tipo de manutenção menos desejado pois, muitas vezes, as paragens das máquinas acontecem em momentos inoportunos por serem épocas de ponta de produção ou em períodos de cronograma apertado, além de ser prejudicial ao equipamento uma vez que reduz o tempo de vida útil da máquina.

É necessário ter uma equipa de manutenção bem administrada e organizada, com formação adequada para que seja possível atender, de forma correta, a todas as solicitações (Assis, 2004).

2.6.5 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é um cronograma de ações planeadas de manutenção com vista à prevenção de falhas e fracassos. O principal objetivo da manutenção preventiva é evitar a falha do equipamento

antes do momento esperado, substituindo componentes desgastados antes que eles realmente falhem. Outros objetivos são garantir a segurança e obter o máximo de vida útil. As atividades de manutenção preventiva incluem verificações de equipamentos, revisão parcial ou completa destes em períodos específicos.

A manutenção preventiva irá resultar em poupanças devido a um aumento de vida útil do sistema de serviço. Alguns dos benefícios a longo prazo deste tipo de manutenção incluem: a redução do tempo de inatividade, a redução da taxa de falhas, confiabilidade e disponibilidade do sistema melhoradas, a diminuição do custo de substituição, a melhoria de recursos de manutenção e melhor gerenciamento de stock e de peças de reposição. Uma das maiores vantagens deste tipo de manutenção é que ela pode ser programada.

A manutenção preventiva pode apresentar-se sob duas formas diferentes: a manutenção preventiva sistemática e a manutenção preventiva condicional (Filipe, 2003).

Manutenção Preventiva Sistemática: É uma manutenção executada em intervalos de tempo fixos e é normalmente usada nas operações de lubrificação, em verificações obrigatórias e na substituição de componentes com custo reduzido. Usualmente, este tipo de manutenção, aplica-se em equipamentos onde a ocorrência de uma avaria pode implicar a paragem da instalação, ou em equipamentos onde uma avaria pode colocar em causa a segurança das pessoas, ou em equipamentos em que uma avaria possa provocar paragens longas na produção.

As vantagens mais significativas deste tipo de intervenção são que, uma vez que as ações na intervenção são pré-determinadas, o custo de cada operação de manutenção é previsto e o facto de as paragens serem programadas facilita a escolha do momento das mesmas, sendo feito normalmente de acordo com a produção. Existem, no entanto, algumas desvantagens deste tipo de manutenção, como por exemplo: o custo de

cada operação torna-se elevado devido à periodicidade das mesmas, há uma maior probabilidade de erro humano devido à frequência das intervenções, o custo da mão-de-obra pode ser elevado e a frequente desmontagem de equipamentos pode induzir à substituição de peças devido à "síndrome de precaução".

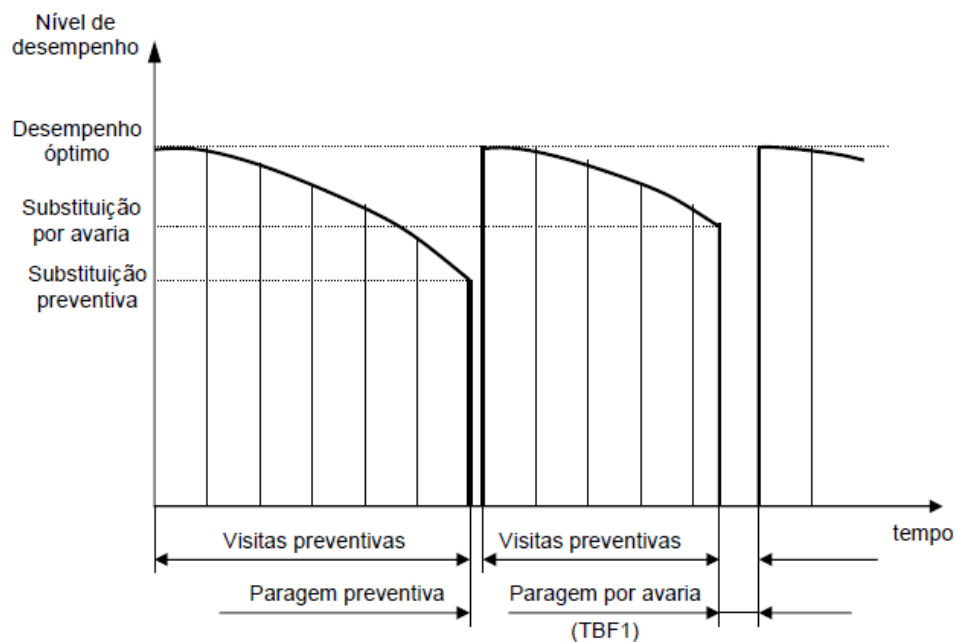


Figura 7: Esquema da manutenção preventiva sistemática.

Imagem obtida de Filipe (2003).

A Figura 7 demonstra a evolução da degradação de um item substituído preventivamente. Após completado o primeiro ciclo tem lugar um novo ciclo, interrompido por avaria daquele item. Esta ocorrência implica, normalmente, paragens mais longas. Pretende-se mostrar que, ainda que um dos objetivos da manutenção preventiva seja evitar a ocorrência de avarias, estas são um facto na manutenção preventiva sistemática (Filipe, 2003).

Manutenção Preventiva Condicionada: Consiste na medição de parâmetros e acompanhamento da sua evolução. Os equipamentos são

vigiados e, quando existirem indícios de mau funcionamento ou aproximação de avaria, são feitas as substituições necessárias preventivamente. O sucesso desta manutenção depende da eficácia dos recursos e da metodologia usada para vigiar os equipamentos, no entanto, surge a dificuldade em estabelecer uma correlação entre um parâmetro mensurável e o estado do sistema.

O lema da manutenção preventiva condicionada é "se funciona bem não mexa" e tem como principais objetivos minimizar os trabalhos não planejados, determinar antecipadamente quando será necessário aplicar serviços de manutenção numa peça específica, aumentar o tempo de disponibilidade das máquinas, impedir a propagação de danos, aumentar a segurança do operador do equipamento, obter ganhos pela redução de custos da manutenção e por redução de perdas de produção.

Fazendo uma comparação entre os dois tipos de manutenção preventiva, pode-se enunciar algumas vantagens da manutenção preventiva condicionada sobre a manutenção preventiva sistemática, tais como:

- Utilização plena do potencial dos equipamentos;
- Redução do consumo e do stock de peças;
- Redução do número de intervenções ao estritamente necessário.

Ainda assim, surgem também certas desvantagens em relação à preventiva sistemática, nomeadamente:

- Dificulta o planeamento das reparações e das renovações dos stocks;
- Requer pessoal mais habilitado (custo de mão-de-obra maior);
- Implica uma gestão individualizada da programação das intervenções;
- Introduce a necessidade de controlar os equipamentos de medida.

A Figura 8 ilustra a evolução ao longo do tempo de um equipamento, submetido a manutenção preventiva condicionada. Vêem-se duas curvas de degradação distintas, embora igualmente progressivas, que conduzem à substituição preventiva. Após cada intervenção verifica-se um retorno ao desempenho ótimo (Filipe, 2003).

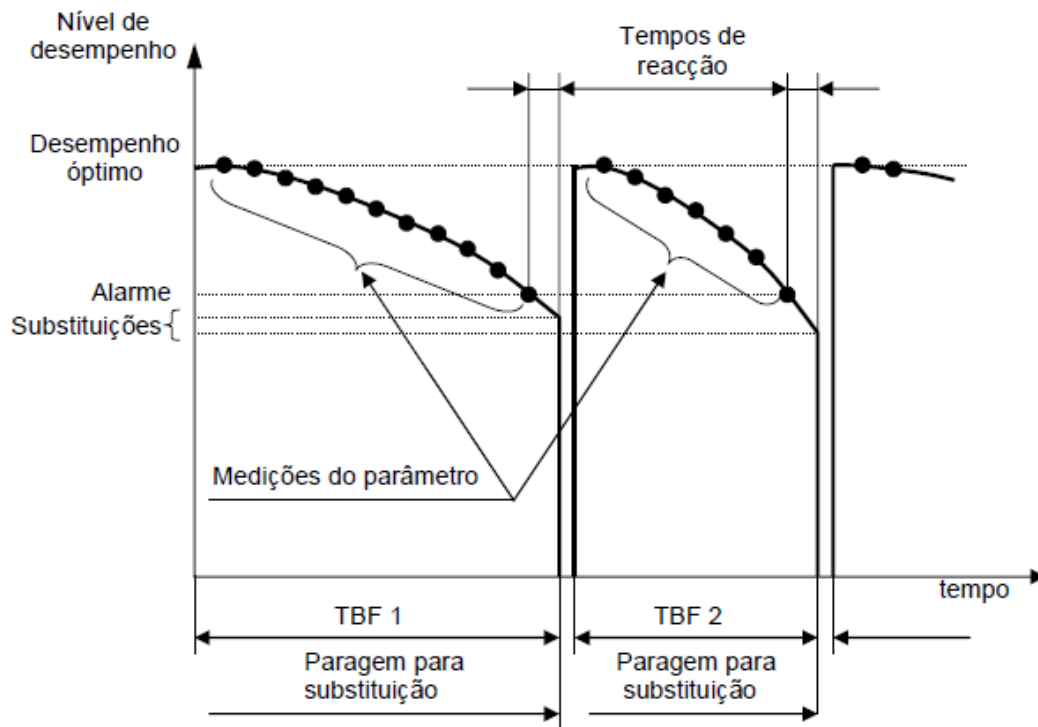


Figura 8: Esquema da manutenção preventiva condicionada.

Imagem obtida de Filipe (2003).

Não é possível afirmar qual dos dois tipos de manutenção preventiva é mais vantajoso. Os dois tipos complementam-se.

Capítulo III: Metodologia Loess e Trajetórias de Processos Estocásticos

Neste capítulo destacam-se as ferramentas estatísticas, essencialmente gráficas, propostas aqui para visualizar a qualidade de funcionamento dos equipamentos com base no registo passado de diferentes variáveis associadas aos tempos de falha dos mesmos. Em primeiro lugar, aborda-se o método de regressão linear para, de seguida, se apresentarem os princípios básicos do método de regressão local ponderada conhecido por *loess* (*LOcal regrESSion*) ou por *lowess* (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*), aplicado para obter uma representação gráfica de possíveis relações entre duas variáveis por meio de uma curva (não paramétrica). Em segundo lugar, relembra-se a definição de trajetórias de um processo estocástico para representar a evolução de fenómenos aleatórios ao longo do tempo.

A regressão local é um método não-paramétrico que estima curvas e superfícies através de métodos de suavização. Tornou-se popular no final dos anos 70 aquando do desenvolvimento dos computadores e da publicação dos estudos independentes de Stone (1977), Cleveland (1979) e Stone (1980). Em grande parte esta popularidade deveu-se a Cleveland quando este desenvolveu o *software Lowess* (Marquetti e Viali, 2004). Hoje em dia o algoritmo da regressão local (conhecido por *loess* ou *lowess*) está implementado em vários pacotes de *softwares* estatísticos (por exemplo, R, S-PLUS, SAS, GAUSS, XploRe...) tornando-se uma importante ferramenta de regressão não-paramétrica.

Ao contrário da análise paramétrica, a análise não-paramétrica estima uma função média sem referência a uma forma pré-estabelecida, o que permite que os dados "falem por si". Uma das grandes vantagens da metodologia *loess* encontra-se na sua flexibilidade, permitindo uma fácil perceção de relações não lineares (Marquetti & Viali, 2004).

3.1 Modelo de Regressão Linear Simples

A análise de regressão é uma das técnicas mais potentes e mais utilizadas em Estatística e engloba modelos mais simples, como o que será aqui apresentado, e outros um pouco mais complexos, como o modelo de regressão linear múltipla e o modelo de regressão não-linear (Guimarães & Cabral, 2007).

Um modelo de regressão linear simples é um modelo que traduz a relação entre uma variável independente, X , e uma variável dependente, Y , de acordo com a seguinte expressão:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i,$$

onde α é o valor do ponto onde a reta ajustada interceta o eixo das ordenadas e β é o declive da relação linear assumida entre a variável resposta, y , e a explicativa, x . O termo ε está associado ao erro do modelo. A palavra "simples" neste modelo significa que existe apenas uma variável explicativa e, se assim não fosse, estar-se-ia perante um modelo de regressão linear múltipla. No modelo de regressão linear simples, os erros assumem-se aleatórios e independentes, com distribuição normal de média nula e variância constante, σ^2 .

Os coeficientes α e β são estimados pelo método dos mínimos quadrados, em que a soma dos quadrados da diferença de cada valor observado x_i , da variável resposta, ao correspondente valor predito, dada pela equação $\hat{y}_i = \hat{\alpha} - \hat{\beta}x_i$, é minimizada levando às seguintes estimativas:

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} \quad e \quad \hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

em que \bar{y} e \bar{x} são as médias da variável resposta e da explicativa, respetivamente (Everitt e Hothorn, 2010).

A variância σ^2 dos erros é estimada por (Everitt e Hothorn, 2010):

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

e a variância estimada de $\hat{\beta}$ é dada por (Everitt e Hothorn, 2010):

$$\text{var}(\hat{\beta}) = \frac{\hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

3.2 Método Loess

Existem vários métodos não-paramétricos para analisar ou prever o comportamento de uma variável dependente em função de uma ou mais variáveis independentes. Estes métodos podem ser divididos em técnicas de suavização ou alisamento e em técnicas de redução de dimensionalidade, sendo as principais técnicas de suavização as médias móveis, *splines*, séries ortogonais e *wavelets*, estimadores de núcleo e regressão local. Quando a regressão envolve duas ou mais dimensões, a suavização torna-se menos viável devido ao problema da dimensionalidade.

A ideia base da regressão local pode ser observada ao considerar-se o mais simples dos modelos de regressão, onde a variável dependente y e a variável independente x se relacionam da seguinte forma:

$$y_i = g(x_i) + \epsilon_i,$$

onde ϵ_i representa o erro independente e identicamente distribuído com distribuição normal de média nula e variância constante.

Os métodos paramétricos estimam a função globalmente, enquanto que a regressão local estima a função " g " na vizinhança de cada ponto de interesse $x = x_0$. Uma forma simples de estimar uma função localmente é considerar a média ponderada das observações da vizinhança do ponto de interesse x_0 . Para se proceder a esta estimativa pelo método *loess* é necessário fazer três escolhas, e são elas: i) o parâmetro de suavização ou amplitude da vizinhança, h , ii) a função peso ou de ponderação que identifica o conjunto dos pontos vizinhos de x_0 , e iii) o grau do polinómio a ajustar.

Também na regressão local, Cleveland (1988) recomendava uma análise de resíduos. Em geral, avalia-se a hipótese da distribuição Gaussiana para os resíduos. Porém, este pode não ser o caso devido, por exemplo, à possível presença de observações atípicas (*outliers*), o que resultará em resíduos com distribuições que se afastam da normal nas caudas da distribuição. Cleveland e Devlin (1988) e Loader (1999) sugerem uma análise gráfica para avaliar a normalidade dos resíduos, a homocedasticidade (isto é, variância constante) do modelo subjacente aos dados, a presença de autocorrelação nos resíduos e o viés nas estimativas.

É importante, por fim, evidenciar a diferença chave entre a análise de resultados provenientes de uma regressão linear paramétrica e de uma regressão local. Na regressão linear paramétrica, os coeficientes são estimados de uma forma funcional previamente selecionada e, de seguida, verifica-se o quão bem os resultados se aproximam dos coeficientes reais através de testes de hipóteses sobre esses coeficientes. Não há grande preocupação com a curva estimada. Na regressão local, a representação gráfica da curva estimada passa a ocupar o papel central da análise. Podem usar-se métodos gráficos para testar algumas das escolhas subjacentes à análise de regressão local, como por exemplo, um diagrama de dispersão para observar o padrão dos dados que auxilia na escolha do grau do polinómio. No entanto, o aspeto central da regressão local é a visualização gráfica.

3.2.1 O parâmetro de suavização

Como referido acima, para estimar a curva de regressão pelo método *loess* é necessário escolher o tamanho da vizinhança a tomar. É o parâmetro de suavização que determina o tamanho h da vizinhança de cada ponto x , na qual a função peso será aplicada. Este parâmetro tem um papel muito importante na variabilidade e no viés da estimativa da resposta para cada ponto. Se o h escolhido for grande, a estimativa terá um viés elevado e uma variabilidade pequena mas, ao contrário, se h for pequeno, a estimativa terá um viés pequeno e uma grande variabilidade. Quando o valor do parâmetro é próximo de zero, a estimativa tende a interpolar as observações, e quando aumenta, a curva estimada aproxima-se de uma regressão linear de grau d , o grau do polinómio usado.

A primeira decisão é a escolha de um h global, que seja satisfatório para todos os pontos de interesse x_0 . A mais simples é considerar o parâmetro constante, que é satisfatório quando a variável dependente possui distribuição uniforme. O grande problema é o caso das vizinhanças vazias, que ocorrem principalmente nas caudas das distribuições ou quando a estimativa envolve mais do que uma dimensão.

Uma outra via é a opção por um parâmetro local, $h(x)$, que possa ser escolhido de forma a conter um número específico de pontos e que resolve o problema das vizinhanças vazias. Esta é conhecida como a abordagem do vizinho mais próximo.

Existem vários métodos para a escolha do parâmetro de localização referenciados na literatura. Loader (1999) comparou os diferentes processos para esta escolha, dividindo-os em dois grupos. Um deles é o grupo dos métodos clássicos, baseados em extensões dos já usados em regressão paramétrica, incorporando o método de validação cruzada, o critério de informação de Akaike e o C_p de Mallow. Todos estes consistem em aplicar alguma medida de ajustamento ou de divergência. O outro grupo é constituído por métodos que se baseiam em anexos. Os

anexos consistem em escrever a função inicialmente estimada como uma função desconhecida e aproximá-la por uma expansão em série de Taylor. Uma estimativa da função é então "anexada" para derivar uma estimativa da tendenciosidade e uma estimativa do ajuste. Segundo Loader (1999), com os métodos clássicos obtêm-se melhores resultados em termos práticos, aplicando-se a um grande número de casos.

No trabalho que aqui se apresenta, o parâmetro de suavização é escolhido de acordo com o método de validação cruzada implementado no *software* estatístico 'R', utilizando os comandos apresentados no Anexo I.

3.2.2 Grau do polinómio local

Para a regressão local deve ser feita a escolha do grau do polinómio local a ajustar. Esta escolha também afeta a relação entre a variância e o viés, na medida em que quanto maior for o grau do polinómio, menor é o viés e maior a variância para um mesmo parâmetro de suavização.

O uso de polinómios de baixa ordem tem-se mostrado ser suficiente para obter estimativas de boa qualidade (Marquetti e Viali, 2004), e normalmente são usados polinómios com grau a variar entre zero e três. Alguns estudos afirmam que o uso de polinómios de grau ímpar apresentam melhores resultados no que diz respeito à redução da variância e do viés. Mas, prova-se que tal é verdade para estimativas com regressões locais constantes e lineares, não sendo necessariamente verdadeiro para estimativas de ordem quadrática e cúbica.

Fez-se a seguinte figura (Figura 9), para ilustrar as estimativas de regressão local utilizando polinómios de grau zero, um, dois e três, sendo o parâmetro de suavização sempre o mesmo.

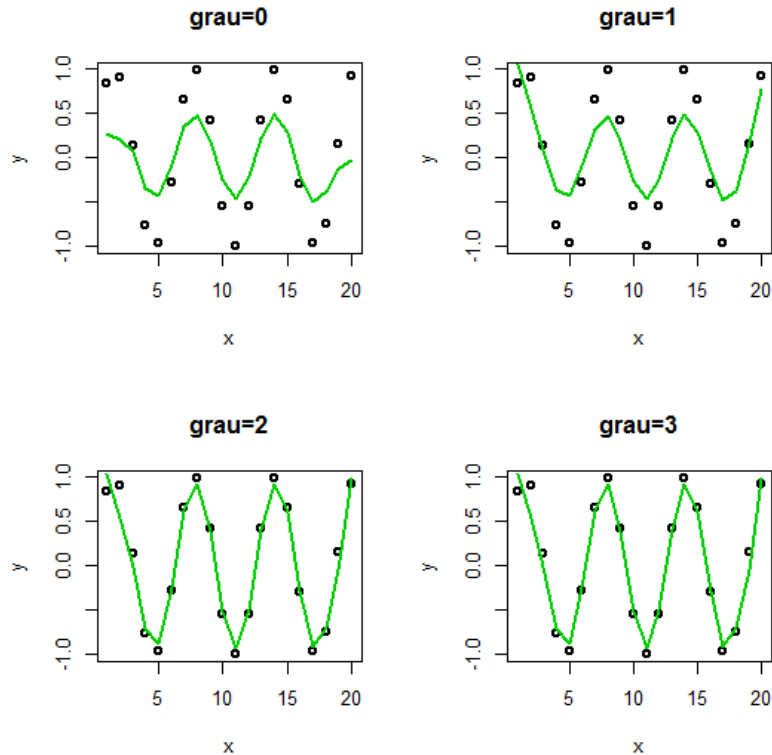


Figura 9: Estimativas de regressão local para polinômios de diferente grau e mesmo parâmetro de suavização.

A escolha do grau do polinômio é guiada pelos objetivos do utilizador e pelos dados que estão a ser analisados. Essa escolha pode ser feita por inspeção visual do gráfico com os dados originais e a estimativa de regressão local. Por exemplo, a visualização de "picos" ou "vales" nos dados são um indício de que o grau do polinômio deve ser dois ou três, enquanto que a observação de um padrão único indicam que o grau do polinômio deverá ser um.

Uma vez que nos conjuntos de dados utilizados neste trabalho não se verificam os "vales" referidos acima, como se verá mais adiante, o polinômio escolhido para o ajustamento será de grau 1.

3.2.3 Função de ponderação

Uma outra escolha a ter em conta na regressão local é a da função de ponderação, que é a função responsável por atribuir pesos às

observações na vizinhança de cada ponto de interesse, x_0 . Segundo Cleveland (1979), esta função deve ser uma função contínua, simétrica, com maior peso em torno de x_0 e peso decrescente à medida que as observações se afastam de x_0 . De entre algumas escolhas possíveis, destacam-se as funções retangular, tri-cúbica, de Epanechnikov e a Gaussiana.

A função retangular pondera as observações em torno de x_0 , a uma distância h , com peso unitário e as restantes com peso nulo. É a função menos utilizada na prática pois resulta em estimativas com descontinuidades.

Cleveland (1979) afirma que uma função que devolve uma boa suavização, na maior parte dos casos, é a função tri-cúbica representada a seguir:

$$V(g) = \begin{cases} (1 - |g|^3)^3, & -1 < g < 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

De acordo com esta função, o peso de um ponto x_l relativamente a um ponto de interesse x_i é dado por:

$$V_{x_i,l} = \begin{cases} \left(1 - |h_i^{-1}(x_i - x_l)|^3\right)^3, & \text{para } -1 < h_i^{-1}(x_i - x_l) < 1, \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde h_i corresponde à amplitude da vizinhança x_i já determinada.

Tal significa que o peso de cada observação x_i é unitária nesse ponto e, à medida que os pontos da sua vizinhança se afastam dele, os seus pesos vão diminuindo. Os pontos situados fora dessa vizinhança não contribuirão para o ajuste local, ou seja, terão um peso nulo.

Uma terceira função peso referida acima é atribuída a Epanechnikov, e é definida por:

$$K = 0,75 \left(1 - \left(\frac{x - x_i}{h_i}\right)^2\right), \text{ se } \left|\frac{x - x_i}{h_i}\right| < 1.$$

A função de ponderação normal é definida à custa da curva de Gauss centrada em x_0 , e tomando como parâmetro de suavização o desvio padrão da amostra. Assim, valores que estiverem situados a mais de duas unidades do desvio padrão receberão um peso negligenciável, pois a área da curva normal além de duas unidades do desvio padrão é muito pequena (cerca de 0,046).

3.2.4 Vantagens e desvantagens do método *loess*

A maior vantagem do método *loess* sobre outros métodos é que não necessita da especificação de uma função para ajustar um modelo a todo o conjunto de dados. Em vez disso, o utilizador apenas tem que escolher o parâmetro de localização e o grau do polinómio local. Além disso, este método é muito flexível, tornando-o ideal para a modelação de processos complexos para os quais não existem modelos teóricos. Estes aspetos combinados com a sua simplicidade fazem deste método um dos mais cativantes métodos de regressão modernos para aplicações que se encaixam no quadro geral de regressão por mínimos quadrados, mas que têm uma estrutura determinística complexa.

Uma desvantagem do método *loess* é o uso menos eficiente dos dados comparativamente a outros métodos de mínimos quadrados. Requer um conjunto de dados de grande dimensão a fim de produzir bons modelos, isto porque a metodologia *loess* assenta na estrutura local dos dados ao realizar um ajustamento local. Assim, este método fornece uma análise de dados menos complexa em troca de maiores custos experimentais. Uma outra desvantagem é o facto de que este método não produz uma função de regressão que possa ser facilmente representada por uma expressão matemática, o que pode dificultar a tarefa do analista ao tentar mostrar resultados a outras pessoas. Por último, constata-se que este método é computacionalmente intensivo, o que no nosso ambiente computacional atual não é um problema de elevada dimensão a não ser

que o conjunto de dados seja demasiadamente grande (Marquetti & Viali, 2004).

3.3 Validação Cruzada

O método de validação cruzada é uma técnica para a escolha do parâmetro de suavização e consiste em retirar o ponto (x_i, y_i) da base de dados e calcular $\hat{g}(x_i)$ apenas com os $n - 1$ pontos restantes, $i = 1, \dots, n$. A estatística de validação cruzada é dada por:

$$VC(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \hat{g}_h^{-i}(x_i) \right)^2$$

onde $\hat{g}_h^{-i}(x_i)$ indica o valor estimado para Y quando o ponto (x_i, y_i) é eliminado.

Para determinar o parâmetro de suavização usando a expressão acima, são selecionados alguns valores de h e, posteriormente, de entre os selecionados, é escolhido o h que minimizar o valor desta expressão.

Apesar deste e de outros métodos de seleção do parâmetro de suavização serem bem fundamentados, as suas prestações são questionadas. Hastie e Tibshirani (1990) mostraram que os valores de h , obtidos pelo método da validação cruzada, apresentam grande variabilidade. Autores defendem que o parâmetro deve ser escolhido com ajuda de gráficos auxiliados por medidas dos graus de liberdade dos suavizadores.

3.4 Adequação do método

Ao realizar qualquer análise estatística é importante avaliar a qualidade de ajuste do modelo aos dados e se os dados atendem aos pressupostos do modelo. A possível influência de observações atípicas e a verificação

dos pressupostos assumidos no ajuste de um modelo de regressão, pode ser feita por diversas ferramentas de diagnóstico.

Uma ferramenta bem conhecida é a análise dos resíduos, ou seja, uma análise sobre a diferença entre os valores observados da resposta e os valores ajustados da resposta definidos pelo modelo. Os gráficos de utilização mais comum para o estudo dos resíduos são os seguintes:

- Gráfico de resíduos *versus* cada variável explicativa do modelo. A presença de uma relação não linear, por exemplo, pode sugerir que um termo de ordem maior na variável explicativa deve ser considerado.
- Gráfico de resíduos *versus* valores ajustados. Este gráfico serve para averiguar se os erros são independentes e se a variância é constante. Para o mesmo efeito pode também construir-se gráficos de resíduos *versus* valores observados. Nestes gráficos deve observar-se uma mancha de pontos com o mesmo tipo de dispersão em torno do eixo das abcissas.
- QQ-plot para os resíduos com base na distribuição Normal, para investigar se os erros provem de uma distribuição Normal.

Normalmente, quando se pretende entender em que medida as variáveis de um modelo ajustado estão relacionadas, poderá recorrer-se ao coeficiente de correlação R e/ou ao coeficiente de determinação R^2 . O coeficiente de determinação, R^2 , nos modelos de regressão linear (paramétrica), é um indicador da qualidade de ajuste da reta de regressão aos dados, enquanto que o coeficiente de correlação, R , é uma medida da força da relação entre as variáveis em causa. Quanto maior for o coeficiente de determinação, mais explicativo é o modelo, e portanto melhor se ajusta à amostra.

O coeficiente de correlação mede a intensidade da relação linear, não sendo planeado para medir a intensidade de uma relação que não seja linear.

Os coeficientes R e R^2 , não podem ser usados como ferramenta de avaliação do ajustamento obtido aquando da utilização do método *loess* uma vez que, o uso da metodologia *loess* está subjacente a uma relação de não linearidade entre as variáveis. Esses coeficientes podem ser usados como forma de identificação da força de associação linear entre as variáveis. Na literatura direcionada à metodologia *loess* não são encontradas referências à avaliação do ajustamento da curva *loess* através do cálculo de um coeficiente de ajustamento da curva aos dados. O que existe, e que Cleveland (1988) utiliza no seu artigo para essa avaliação, são diagnósticos do ajustamento por meio de gráficos de resíduos.

A vantagem destes diagnósticos gráficos é permitir visualizar, no espaço das variáveis independentes, a existência, ou não, de viés e o comportamento da variabilidade das estimativas.

3.5 Trajetórias de um processo estocástico

Um processo estocástico pode ser definido como uma família de variáveis que evoluem ao longo do tempo de forma aleatória e imprevisível. De uma maneira mais formal, um processo estocástico é apresentado através de uma lei de probabilidade para a evolução das variáveis X_t com o tempo t . Isto é, dados os tempos $t_1 < t_2 < t_3 < \dots$ é possível calcular a probabilidade correspondente aos valores X_1, X_2, X_3, \dots estarem num intervalo específico.

Pode-se representar, matematicamente, um processo estocástico X como uma família de variáveis definidas num mesmo espaço de probabilidades Ω e de acordo com a seguinte expressão:

$$X = \{X_t(\omega), t \in T, \omega \in \Omega\}.$$

O valor de $X_t(\omega)$ é uma função de dois argumentos, o tempo t e as possíveis realizações ω de Ω . Logo, para um instante de tempo t fixo, a variável aleatória é:

$$X_t = X_t(\omega), \quad \omega \in \Omega,$$

com uma dada distribuição de probabilidades.

Por outro lado, para um determinado estado $\omega \in \Omega$, obtém-se uma função (não aleatória) de t dada por:

$$X_t = X_t(\omega), t \in T.$$

A esta função dá-se o nome de realização do processo X . Um gráfico da realização X_t em função do tempo t chama-se trajetória do processo X .

No âmbito do presente trabalho, foram investigadas a evolução ao longo do tempo de diversas quantidades aleatórias (e determinísticas) como: os tempos de falha devidas a intervenções preventivas e/ou a intervenções corretivas, os tempos médios de intervenções corretivas entre intervenções preventivas, o número de paragens para intervenções corretivas entre intervenções preventivas, entre outros. Da análise preliminar de várias trajetórias, observou-se ser de interesse analisar a evolução ao longo do tempo da razão entre o número de paragens da máquina para intervenções preventivas até ao instante t e o número de paragens da máquina para a realização de intervenções preventivas e de intervenções corretivas até ao instante t . A elaboração desses gráficos permite visualizar a evolução dessa razão ao longo do tempo providenciando um instrumento gráfico para investigar a variação do número de intervenções corretivas em função do número de intervenções preventivas realizadas na máquina ao longo do tempo.

Esses gráficos serão usados para complementar a inspeção da curva *loess* ajustada aos dados recolhidos para cada máquina, para que melhor possa ser identificado e classificado o plano de prevenção utilizado em cada caso e para auxiliar na sugestão de recomendações sobre esse plano.

Capítulo IV: Aplicação prática dos métodos

No corrente capítulo são aplicadas todas as metodologias e técnicas apresentadas no capítulo anterior a um conjunto de dados reais, obtidos pela própria empresa, relativamente aos instantes temporais em que foram feitas intervenções preventivas e intervenções corretivas em algumas das suas máquinas. Esta aplicação prática tem como objetivos:

- i. quantificar, de algum modo, o grau de fiabilidade em que cada máquina em estudo se encontra no presente,
- ii. entender se esse grau de fiabilidade está dependente do plano de manutenções preventivas nelas aplicado, e
- iii. analisar o que pode ou deve ser alterado nesse plano de manutenção para que se consiga manter o grau de fiabilidade dessa máquina o mais elevado possível.

O estudo que será apresentado baseia-se, na sua maior parte, na visualização e interpretação de gráficos. Os gráficos serão obtidos por meio do *software* estatístico 'R'. A interpretação dos gráficos será essencial para que se entendam as possíveis relações existentes entre a fiabilidade e o plano de manutenção preventivo relativamente a cada uma das máquinas em estudo. Assim sendo, é oportuno apresentar algumas instruções de como interpretar cada um dos diferentes tipos de gráficos antes de se realizar a análise individual de cada uma das máquinas. Este processo facilita o entendimento e um melhor acompanhamento de toda a análise, por parte de qualquer indivíduo que tenha o objetivo de alargar os seus conhecimentos na área de Estatística e de compreender como ela pode ser aplicada na gestão da manutenção.

4.1 Interpretação do gráfico da Regressão Localmente Ponderada

O método *loess*, já apresentado no capítulo III, será agora a ferramenta mais importante para analisar a influência do plano de manutenção preventivo no funcionamento, continuado ou não, de cada máquina. Em particular, irá ajudar a compreender a relação, caso exista, entre o tempo decorrido entre intervenções preventivas e o tempo sem intervenções (de qualquer natureza).

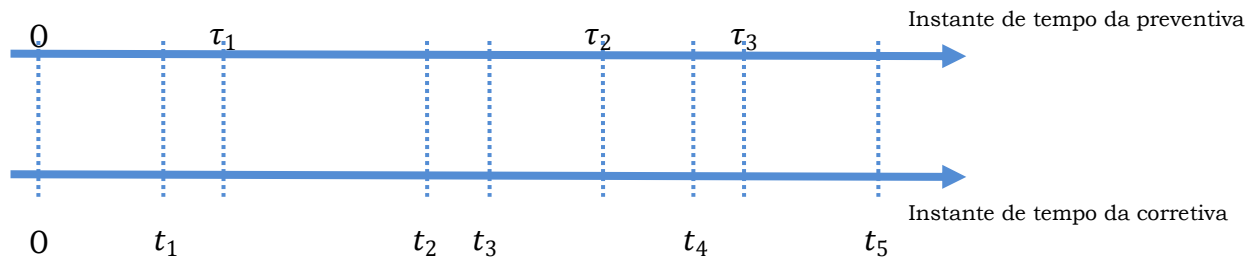
Como já referido anteriormente, um dos objetivos principais do estudo realizado neste trabalho era o de tentar perceber de que forma o plano de manutenção preventivo influencia a fiabilidade de uma máquina. Para que fosse possível encontrar esta relação, foi necessário determinar como podiam estas variáveis ser quantificadas. E esta foi uma das árduas tarefas deste trabalho.

Foi apontado no capítulo II que, sendo a fiabilidade de um equipamento uma probabilidade de este funcionar sem falhas durante um certo período de tempo e sob certas condições do meio envolvente, quantificar a fiabilidade é um processo complexo e que, por isso, normalmente se recorre a indicadores para que esta quantificação seja possível.

Numa das primeiras abordagens, experimentou-se relacionar o tempo médio em que uma máquina está sem receber qualquer tipo de manutenção com o tempo decorrido entre duas intervenções preventivas consecutivas, isto é, para determinado tempo decorrido entre intervenções preventivas consecutivas, era calculado o tempo médio que decorria entre todas as intervenções de manutenção aplicadas na máquina nesse mesmo intervalo de tempo. Ou seja, o conjunto de dados a relacionar, consequentemente a usar no ajuste de uma curva construída pelo método *loess*, seria constituído pelos pares ordenados:

(tempo entre preventivas consecutivas, tempo médio sem intervenções),

em que a unidade de tempo é medida em dias. Construiu-se o seguinte esquema e a Tabela 1, que ilustram o cálculo geral desses pares ordenados:



Tempo entre preventivas consecutivas	Tempo médio sem intervenções
$\tau_1 - 0 = \tau_1$	$\frac{(t_1 - 0) + (\tau_1 - t_1)}{2}$
$\tau_2 - \tau_1$	$\frac{(t_2 - \tau_1) + (t_3 - t_2) + (\tau_2 - t_3)}{3}$
$\tau_3 - \tau_2$	$\frac{(t_4 - \tau_2) + (\tau_3 - t_4)}{2}$

Tabela 1: Ilustração da construção dos pares ordenados (tempo entre preventivas consecutivas, tempo médio sem intervenções).

Depois de se representarem estes pontos num gráfico de dispersão, proceder-se-ia ao ajustamento de uma curva *loess* aos dados. Este procedimento foi ainda aplicado e pode ver-se um exemplo do mesmo na figura seguinte:

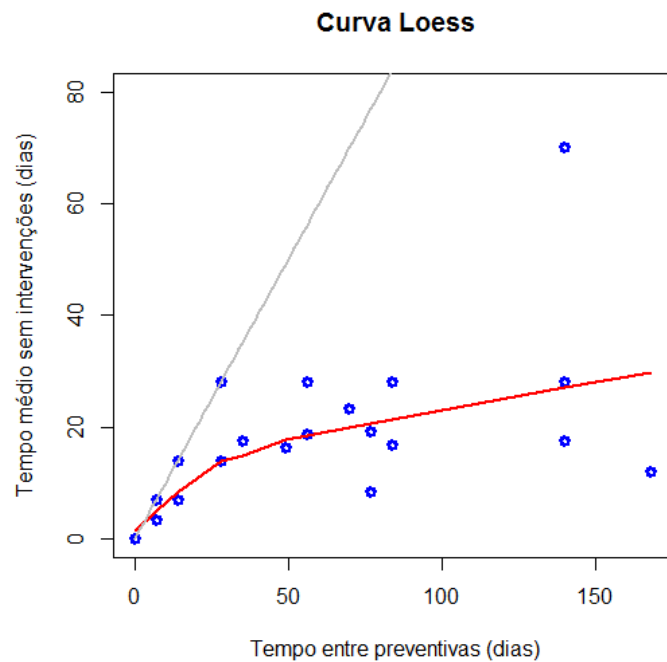
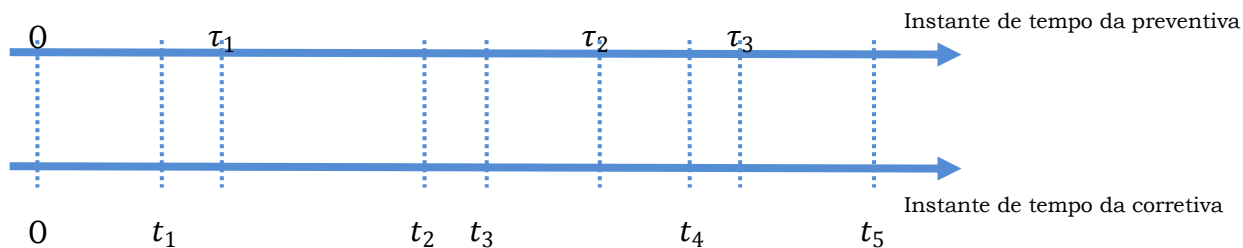


Figura 10: Curva *loess* (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº2102 quando se analisa o tempo médio sem intervenções entre preventivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.

No entanto, esta ideia foi desconsiderada por um simples motivo: o tempo médio sem intervenções pode transmitir uma ideia enviesada do momento em que ocorre a primeira avaria depois de uma intervenção preventiva. Assim sendo, uma abordagem mais correta seria a de relacionar o tempo em que uma máquina permanece sem receber qualquer tipo de manutenção com o tempo decorrido entre intervenções preventivas consecutivas. O novo conjunto de dados seria então constituído pelos pares ordenados:

(tempo entre preventivas consecutivas, tempo sem intervenções),

mantendo-se o dia como unidade de tempo. O seguinte esquema e a Tabela 2 construídos, ilustram o cálculo geral desses pares ordenados:



Tempo entre preventivas consecutivas	Tempo sem intervenções
$\tau_1 - 0 = \tau_1$	$t_1 - 0 = t_1$
$\tau_1 - 0 = \tau_1$	$\tau_1 - t_1$
$\tau_2 - \tau_1$	$t_2 - \tau_1$
$\tau_2 - \tau_1$	$t_3 - t_2$
$\tau_2 - \tau_1$	$\tau_2 - t_3$
$\tau_3 - \tau_2$	$t_4 - \tau_2$
$\tau_3 - \tau_2$	$\tau_3 - t_4$

Tabela 2: Ilustração da construção dos pares ordenados (tempo entre preventivas consecutivas, tempo sem intervenções).

Note-se que este último conjunto de dados tem uma outra vantagem sobre o anterior. O tamanho deste é substancialmente maior, e como referido anteriormente, o método *loess* produz melhores resultados quanto maior for o tamanho do conjunto de dados.

Representando os pares ordenados desse conjunto de dados num diagrama de dispersão, continua a não transparecer a existência de uma relação linear entre as variáveis (Figura 11). Assim, decide-se

aplicar novamente a metodologia *loess* para ajustar uma curva aos dados. Um exemplo deste ajustamento está representado na Figura 11, novamente para os dados relativos à máquina nº 2102, um dos centros de maquinação GROB existentes na fábrica Renault CACIA.

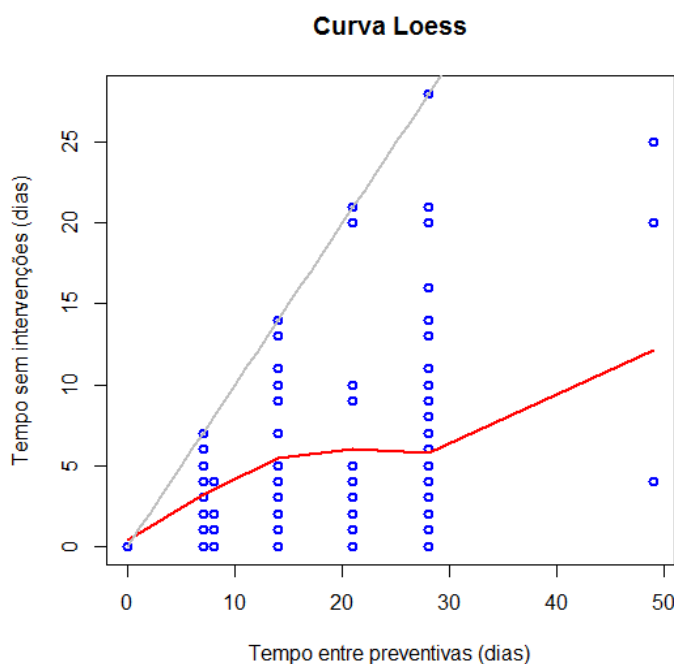


Figura 11: Curva *loess* (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº 2102, quando se analisa os tempos sem intervenções entre preventivas consecutivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.

São agora apresentadas algumas instruções de como pode ser feita a análise deste tipo de gráficos para tornar acessível a sua leitura e interpretação.

Pode ver-se no gráfico uma reta a cinzento e uma curva a vermelho.

- A reta a cinzento representa a reta de equação $y = x$, e que servirá de referência para a interpretação da curva a vermelho. Repare-se que os valores da variável "tempo entre preventivas" não podem assumir valores superiores aos da variável "tempo sem intervenções" e, por esta razão, todos os pontos do gráfico

estarão, obrigatoriamente, situados abaixo da reta ou, no máximo, sobre esta. Encontrar pontos sobre a reta a cinzento significa que existem casos em que, para intervenções preventivas espaçadas de x dias, não existiram intervenções corretivas nesses x dias. O ideal seria ter uma grande quantidade de pontos sobre esta reta.

- A curva a vermelho é a curva construída pelo método *loess* e relaciona o tempo esperado sem intervenções com o tempo entre intervenções preventivas. Quanto mais próxima esta curva estiver da reta $y = x$, maior é a tendência, em termos médios, para não se registarem avarias quando o tempo decorrido entre intervenções preventivas é de x dias. Conclui-se que, o objetivo é encontrar um plano de manutenção preventivo que mantenha a curva a vermelho o mais próximo possível da reta a cinzento. Quando se verifica um afastamento da curva da reta, é porque estão a ocorrer, em média, avarias com uma frequência cada vez maior.

4.2 Interpretação do gráfico de trajetórias

Com o objetivo de compreender o comportamento das avarias tendo em conta o plano preventivo, analisaram-se algumas funções. Pensou-se ser de interesse, para este trabalho, averiguar de que forma ocorriam as intervenções preventivas ao longo do tempo e, designando por $x(t)$ o número de preventivas até ao t – ésimo dia, traçar um gráfico construído com os pontos $(t, x(t))$. No entanto, a quantidade $x(t)$ é uma quantidade determinística, uma vez que os planos de manutenção preventivos são constituídos por intervenções programadas e, portanto, a forma como estas intervenções se distribuem não é aleatória.

Seguidamente, pensou-se ser útil, avaliar de que forma as intervenções corretivas de prioridade zero² evoluíam ao longo do tempo em cada máquina e, designando por $C(t)$ o número de intervenções corretivas de prioridade zero até ao t – ésimo dia, construir o gráfico com os pontos $(t, C(t))$. No entanto, este gráfico apenas devolveria a informação acerca do aumento ou decréscimo do número de avarias com perda de produção, ocorridas numa máquina, ao longo do tempo, não sendo possível perceber, de uma forma direta, qual a relação entre o número de corretivas e o plano preventivo.

Por forma a se conseguir relacionar, de forma direta, a evolução do número deste tipo de avarias com o número de intervenções preventivas, construiu-se a trajetória do processo estocástico $\{R(t), t \in \mathbb{N}_0\}$, onde $R(t)$ é definido como sendo a razão entre o número de intervenções preventivas e o número de intervenções preventivas juntamente com o número de intervenções corretivas de prioridade zero, ocorridas em t dias. A quantidade aleatória $R(t)$ define-se da seguinte forma:

$$R(t) = \frac{X(t)}{X(t) + C(t)}, t \in \mathbb{N}_0,$$

onde $X(t) = n^\circ$ de intervenções preventivas até ao t – ésimo dia e $C(t) = n^\circ$ de intervenções corretivas de prioridade zero até ao t – ésimo dia.

Observe-se que $R(t)$ indica a proporção de intervenções que, no t – ésimo dia, são preventivas e, por complementaridade, $1 - R(t)$ indica a proporção de intervenções que, no t – ésimo dia, são corretivas de prioridade zero.

A trajetória corresponde à representação dos pontos:

$$(t, R(t))$$

² corretivas de prioridade zero - intervenções de correção para avarias que provocam perda de produção.

O que se pode analisar deste gráfico é então informação relativa à percentagem de vezes em que a máquina esteve parada para manutenções de prevenção ou devido a avaria com perda de produção. Este tipo de informação é útil na medida em que pode complementar as conclusões obtidas dos gráficos descritos na secção anterior com o ajustamento da curva *loess*. Ora, se uma máquina apresentar uma percentagem elevada de avarias com perda de produção, tal sugere que o plano de manutenção preventivo aplicado nessa máquina não está a ser suficiente para resolver eventuais avarias futuras, o que pode indiciar que seja necessário aplicar intervenções preventivas nessa máquina com uma maior frequência.

Aquando da construção de todas as trajetórias $(t, R(t))$, para todas as máquinas alvo deste estudo, foi visível a existência de pelo menos duas características diferenciadas em cada gráfico:

- i. inicialmente, para valores pequenos de t , ou seja para $t < t_0$ e para algum t_0 , onde se observa mais variabilidade ou instabilidade do processo; e,
- ii. parte central e seguinte, para $t \geq t_0$, onde se observa uma tendência para um comportamento linear do processo.

No presente estudo não será destacada a parte inicial do processo $\{R(t), t \in \mathbb{N}_0\}$ assumindo-se que esta não faz parte da regularidade estatística da fiabilidade dos equipamentos. Para a restante parte, e uma vez que o valor de t_0 varia de máquina para máquina, não sendo fácil identifica-lo, para a análise do comportamento linear do processo $\{R(t), t \in \mathbb{N}_0\}$ de cada máquina, decidiu-se optar por omitir cerca de 20% dos pares ordenados $(t, R(t))$ com os valores mais baixos de t .

Analisando as trajetórias correspondentes às restantes 80% das observações para todas as máquinas, foi possível observar que, em quase todas elas, o conjunto de pontos que lhes dá a forma tem, ou um aspeto de uma "linha" crescente, ou de uma "linha" decrescente, ou até

em alguns casos de uma linha aparentemente horizontal. Na Figura 12 é apresentado um exemplo gráfico da trajetória de uma das máquinas em estudo tomando 80% das observações. Este aspeto gráfico leva a crer que, na sua maioria, esses pontos se situam em torno de uma reta imaginária, com certo declive, m . Por forma a ter uma maior percepção desse comportamento linear das trajetórias associadas a cada máquina, é de interesse ajustar uma reta aos pontos que definem cada trajetória. Essa reta será obtida usando regressão linear simples. Tal ajustamento indicará a reta que melhor se adequa a cada trajetória e assim facilitar estabelecer algumas conclusões importantes em relação ao problema proposto neste trabalho.

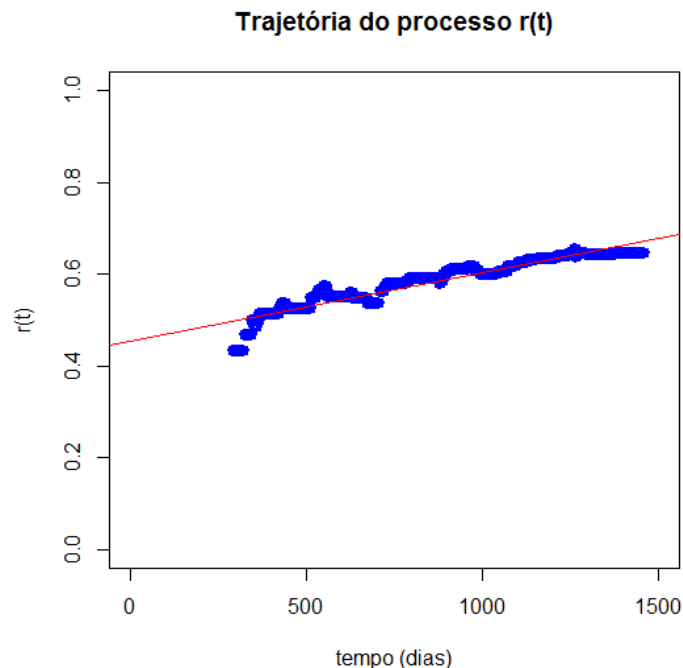


Figura 12: Gráfico da trajetória da razão entre o número de intervenções preventivas e o número de intervenções preventivas e de prioridade zero ao longo do tempo t (em dias) para a máquina nº 2123.

É necessário entender qual o significado do declive da reta de regressão no contexto do problema. Note-se que quando a reta apresenta um declive positivo, $m > 0$, ela é designada como crescente ao que se associa que, ao longo do tempo, o valor da razão $r(t)$ é também crescente. Facilmente se compreende que um aumento, ao longo do

tempo, da percentagem de vezes em que a máquina está parada para ações de prevenção (aumento do numerador de $r(t)$) ou uma diminuição (apenas) do número de avarias com perda de produção (aumento do denominador de $r(t)$) traduz-se num crescimento de $r(t)$. Analogamente se conclui para o caso de m ser negativo. Assim, o valor do declive da reta de regressão sobre a qual rondam os pontos da trajetória pode providenciar informação sobre o quão é acentuado é o crescimento (declive negativo) ou o decrescimento (declive positivo) da percentagem de avarias com perda de produção (isto é, da razão $1 - r(t)$).

Depois de se obter a reta de regressão ajustada a cada trajetória, é conveniente analisar a informação que este ajuste providencia. A análise a ser realizada não deve basear-se apenas no valor do declive da reta ajustada, mas complementada com a análise do suporte ou domínio dos valores possíveis de $r(t)$. Na realidade, se $r(t)$ tomar valores inferiores a 0,5 significa que mais de metade das intervenções (em análise) foram corretivas de prioridade zero, o que alerta sobre a eventualidade do plano preventivo não estar a ser eficaz. Em contrapartida, se $r(t)$ tomar valores superiores a 0,5 isto poderá sugerir que o plano preventivo produz efeito reduzindo a frequência de corretivas de prioridade zero. Assim, a análise dos valores possíveis de $r(t)$ providencia informação sobre a qualidade do plano de prevenção, indicando se está ou não num nível satisfatório.

São agora detalhadas algumas indicações de como interpretar os gráficos de ajustamento de uma reta às trajetórias dos processos para diferentes situações:

- A uma reta ajustada com declive positivo, $m > 0$, está associada a uma trajetória crescente. Tal indica que, ao longo do tempo, $r(t)$ toma valores cada vez mais elevados. Em termos de intervenções de manutenção isto significa que, com o tempo, o número de paragens da máquina para realização de intervenções preventivas está a aumentar em relação ao número de paragens da máquina devido a

avarias. Outro dado importante é o valor do declive, ou seja, quanto maior for o valor do declive da reta ajustada, mais rápido é o crescimento do número de prevenções relativamente ao número de intervenções corretivas de prioridade zero. Outra informação que pode ser obtida na análise da trajetória do processo $\{R(t), t \in \mathbb{N}_0, \}$ sai de forma direta da posição da reta relativamente ao referencial (isto é, dos valores de $R(t)$). Se uma reta de ajuste se situa perto do eixo das abcissas, tal evidencia que a trajetória $r(t)$ está a tomar valores reduzidos, e isto significa que existiram muitas avarias com perda de produção comparativamente ao número de intervenções preventivas. O contrário acontece quando a reta ajustada se encontra afastada do eixo das abcissas. Concluindo, pode nesta situação ($m > 0$) uma reta de ajuste indicar que existiu uma melhoria no plano de prevenção aplicado a uma determinada máquina, não significando no entanto, que essa melhoria coloque a máquina num nível aceitável ou satisfatório no que diz respeito à sua fiabilidade.

- No caso do declive da reta ajustada ser negativo, $m < 0$, as conclusões a retirar são quase todas de forma oposta às do caso anterior. Isto porque, um declive negativo evidencia que, ao longo do tempo, o número de avarias com perda de produção está a aumentar roubando lugar às intervenções de prevenção. Neste caso, quanto maior, em módulo, for o valor do declive da reta ajustada mais rápido será o crescimento do número deste tipo de avarias em relação ao número de intervenções preventivas. Quanto à posição relativa da reta no referencial, as conclusões são as mesmas que no ponto anterior.

- Um terceiro caso, pode ser o caso em que a reta de ajuste aparenta um aspeto horizontal, $m \cong 0$. Este caso significa que, ao longo do tempo, a trajetória $r(t)$ não apresenta alterações em termos médios e portanto, o plano de manutenção preventivo tem sido constante e a máquina tem reagido de forma também constante a esse plano no que diz respeito à quantidade de avarias com perda de produção. Basta assim ver qual a posição da reta de ajuste em relação ao referencial para concluir se esse plano de manutenção preventivo faz corresponder ao objetivo de ter poucas avarias com perda de produção. Rapidamente se entende que uma reta de ajuste constante e afastada do eixo das abcissas, representa a trajetória desejada para qualquer máquina.

4.3 Análise de resultados detalhada para 3 máquinas

Depois de apresentadas as indicações sobre leitura e interpretação dos gráficos, irá apresentar-se agora uma análise detalhada destes mesmos gráficos para três das máquinas GROB presentes nas UET's da Renault. Uma análise menos descritiva para as restantes máquinas GROB será apresentada posteriormente.

As máquinas GROB em estudo são máquinas cujo processo de maquinação é aplicado a diferentes tipos de componentes para motores. Esses componentes podem ser bombas de óleo, suporte de injetores ou coletores. A maior parte destes são componentes de alumínio, com exceção dos coletores que são peças em ferro fundido.

As análises que a seguir se apresentam são referentes às máquinas nº 2102, que máquina suporte de injetores, nº 2109, que máquina coletores, e nº 2123, que máquina bombas de óleo.

4.3.1 Máquina nº 2102

O gráfico da figura seguinte relaciona os tempos sem intervenções com os tempos entre intervenções preventivas para a Máquina nº 2102.

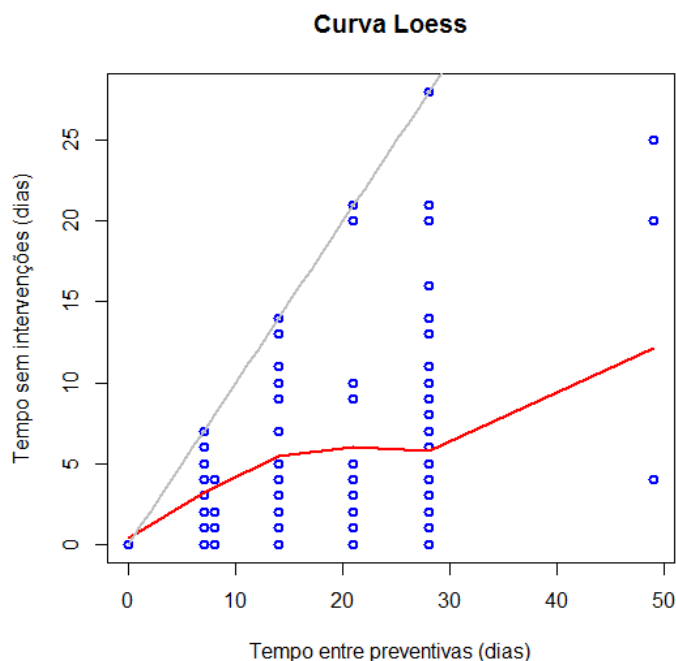


Figura 13: Curva *loess* (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº 2102, quando se analisa os tempos sem intervenções entre preventivas consecutivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.

Afirmou-se e explicou-se anteriormente que o ideal neste tipo de gráficos é encontrar vários pontos sobre a reta a cinzento, e ter a curva a vermelho o mais próxima tanto quanto possível desta reta. Para os casos em que as intervenções preventivas são espaçadas no tempo de 0, 7, 14, 21 e 28 dias, observam-se pontos sobre a reta $y = x$. Isto significa que existiram alguns casos em que para estes tempos entre preventivas não existiram intervenções corretivas. Para intervenções preventivas realizadas com intervalos de tempo superiores a 14 dias, observa-se que a curva a vermelho sofre uma quebra afastando-se mais rapidamente

da reta a cinzento. Este comportamento da curva evidencia que, quando as intervenções preventivas são espaçadas por mais de 14 dias, o número de avarias na máquina aumenta e o tempo que decorre entre avarias diminui. Note-se também que a curva volta a apresentar um aspeto crescente, mas mantém-se cada vez mais afastada da reta a cinzento. No entanto, tal traçado é influenciado pelos três últimos pontos representados no gráfico os quais não devem ser considerados, uma vez que foram muito poucas as vezes em que se aplicaram preventivas espaçadas por 49 dias, como se pode ver na Figura 17.

Avalie-se agora os gráficos de barras das frequências absolutas dos tempos entre intervenções.

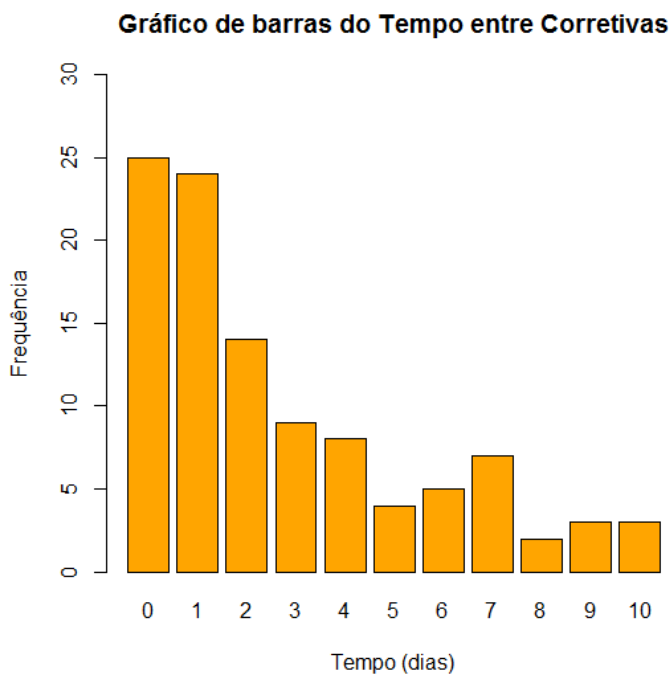


Figura 14: Gráfico de barras do tempo entre intervenções

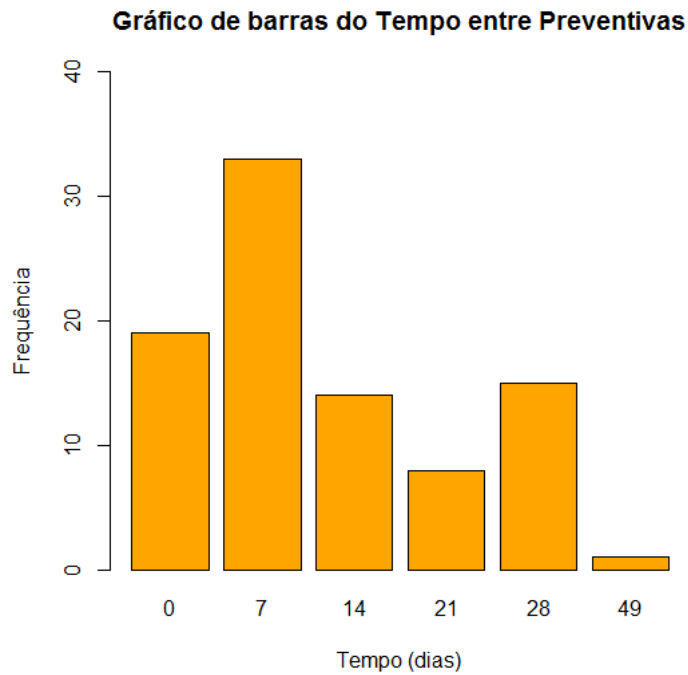


Figura 15: Gráfico de barras do tempo entre intervenções

Vê-se na Figura 14 que existe um grande número de intervenções corretivas com um pequeno intervalo de tempo entre elas, são mais de 80 e representam a maior parte das avarias ocorridas nesta máquina. Na Figura 15 observa-se que a maior parte das intervenções preventivas são aplicadas com curtos intervalos de tempo entre elas (7 em 7 ou 14 em 14 dias), mas que existe ainda um número relativamente elevado de preventivas espaçadas de 21 e 28 dias.

Observem-se, agora, os gráficos relativos à trajetória do processo $R(t)$ referente a esta mesma máquina (Figura 16). O gráfico da esquerda diz respeito à trajetória traçada usando todos os valores do conjunto de dados, enquanto que a segunda representa a trajetória não contabilizando cerca de 20% dos dados iniciais.

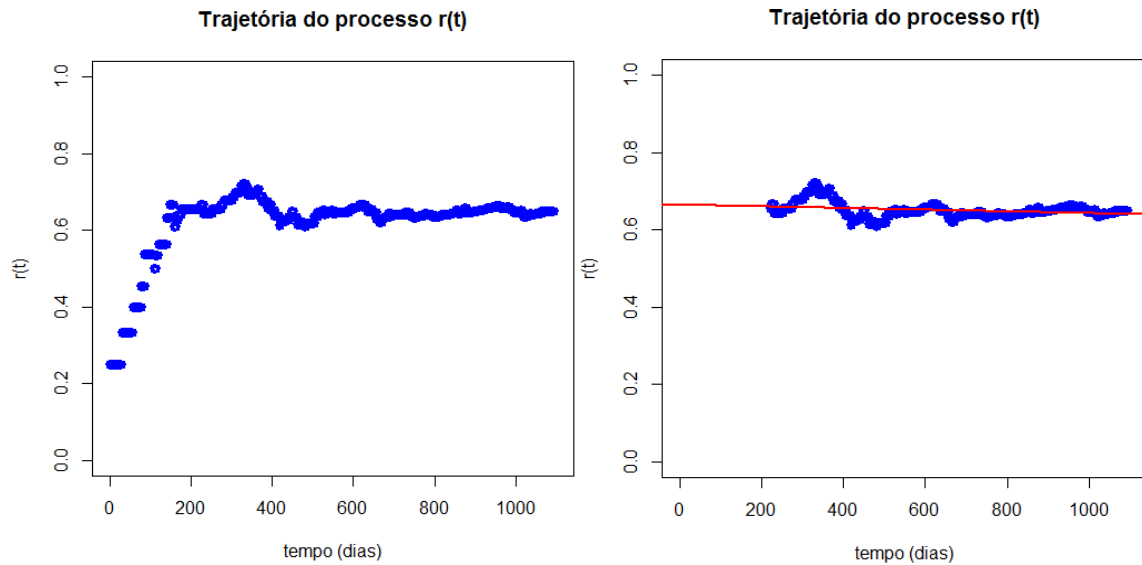


Figura 16: Gráficos das trajetória do processo $R(t)$.

Foi visto anteriormente, que deste tipo de gráfico se consegue retirar alguma informação importante observando o declive da reta ajustada à trajetória e a posição desta relativamente ao referencial.

Ao observar a reta de ajustamento, é notório que ela apresenta um valor para o declive muito próximo de zero, uma vez que apresenta um aspeto horizontal. Como tal, pode afirmar-se que, ao longo do tempo, o plano de manutenção preventivo tem conduzido a um processo constante de resposta da máquina em termos de avarias com perda de produção. Quanto à posição da reta ajustada relativamente ao referencial, observa-se que os pontos que desenham a trajetória se situam em torno, aproximadamente, do valor 0.65, como se verifica pela seguinte expressão da reta de regressão ajustada, $y = -2.215 \times 10^{-5}x + 0.6649$. É possível, desta forma, afirmar que cerca de 65% das vezes em que se fazem manutenções com paragens desta máquina, elas são de caráter preventivo.

Faz-se agora uma análise ao gráfico dos valores preditos *vs* resíduos do ajustamento da curva *loess* obtida acima, bem como do *qqnorm* para o

teste da normalidade dos resíduos. Estes gráficos encontram-se no Anexo II.

O gráfico dos valores preditos (tempos médios entre intervenções) *vs* resíduos são apropriados para examinar a suposição de variância constante dos resíduos (isto é, a presença de homogeneidade das variâncias). Normalmente, a falta de homogeneidade das variâncias tende a produzir um gráfico em que os resíduos se disponham em "forma de megafone". A falta de homogeneidade denomina-se por heterogeneidade.

No gráfico apresentado no Anexo II, observa-se que os resíduos se dispõem em "forma de megafone" (assinalado a verde no gráfico), o que indica que a variância dos resíduos não é constante e que o modelo é heterocedástico. Isto significa que, quanto maiores são os valores preditos, maior é a dispersão dos resíduos. Os maiores valores preditos ocorrem para tempos entre preventivas maiores. Tal sugere que a variância é maior quanto maior for o intervalo de tempo entre intervenções preventivas.

Pela observação do *qqnorm*, também no Anexo II, para a máquina nº 2102 vê-se, como era esperado, que os resíduos se afastam da normal nas caudas da distribuição. No entanto, os valores centrais situam-se sobre e em torno da reta.

Uma vez que através da visualização gráfica não é possível avaliar estatisticamente se os resíduos provêm de uma distribuição normal, efetuaram-se os testes de Shapiro-Wilk e de Anderson-Darling obtendo para valores de prova, respetivamente, 1.449×10^{-13} e 2.2×10^{-16} .

Vê-se claramente que, para qualquer um dos testes aplicados, se tem valor da prova $< \alpha$, e assim se conclui que existem motivos para rejeitar a normalidade dos resíduos.

O pressuposto de normalidade não é, então, satisfeito. A falta de normalidade pode ser causada pela heterogeneidade de variâncias ou ainda pela falta de ajuste do modelo. No entanto, a metodologia *loess* foi aplicada para esclarecer uma relação entre a fiabilidade de um equipamento (aqui definido em termos do tempo entre intervenções) e o

tempo que decorre entre intervenções preventivas, e tem como objetivo encontrar um processo gráfico de caracterizar essa relação em termos médios, não estando debruçado sobre a qualidade do ajuste dos pontos por si ao modelo.

Analisando em conjunto toda a informação recolhida dos gráficos anteriores, é viável afirmar que esta máquina apresenta um comportamento satisfatório uma vez que a percentagem de avarias não é elevada e a sua resposta ao plano de manutenção preventivo se mantém constante. No entanto, os resultados sugerem que se devem evitar as intervenções preventivas espaçadas de 21 ou mais dias, já que se observa, no gráfico da curva *loess*, que para esse casos surgem mais avarias, e aumentar o número de intervenções preventivas espaçadas de 7 ou 14 dias.

Nos anexos III, IIV e V encontram-se os scripts com os comandos usados no *software 'R'* para obtenção de todos os gráficos apresentados para a análise da máquina nº 2102. Para as restantes análises os scripts constroem-se de forma análoga.

4.3.2 Máquina nº 2109

O gráfico da figura seguinte relaciona os tempos sem intervenções com os tempos entre intervenções preventivas para a Máquina nº 2109.

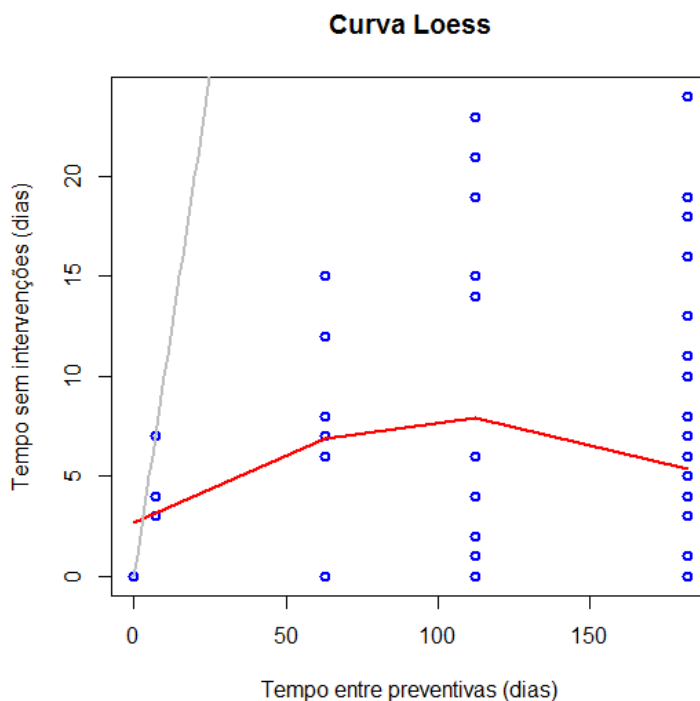


Figura 17: Curva *loess* (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº 2109, quando se analisam os tempos sem intervenções entre preventivas consecutivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.

A curva aqui apresentada não se identifica de todo com a curva desejada. Vê-se que existem apenas quatro formas diferentes de aplicar preventivas, e são elas espaçadas de 7, 63, 112 ou 182 dias, e que para estes dois últimos casos o número de avarias é bastante elevado e estas são muito próximas umas das outras. Estes são os factos que provocam um gradual afastamento da curva em relação à reta $y = x$.

Note-se que, as peças maquinadas nesta máquina são de ferro fundido e, devido ao seu elevado grau de dureza, a maquinação deste tipo de componentes torna-se mais exigente e agressiva para a máquina. Assim

sendo, é normal que esta apresente um maior número de avarias e que seja mais difícil mantê-la num bom nível de desempenho.

Observem-se, agora, os gráfico de barras das frequências absolutas dos tempos entre intervenções.

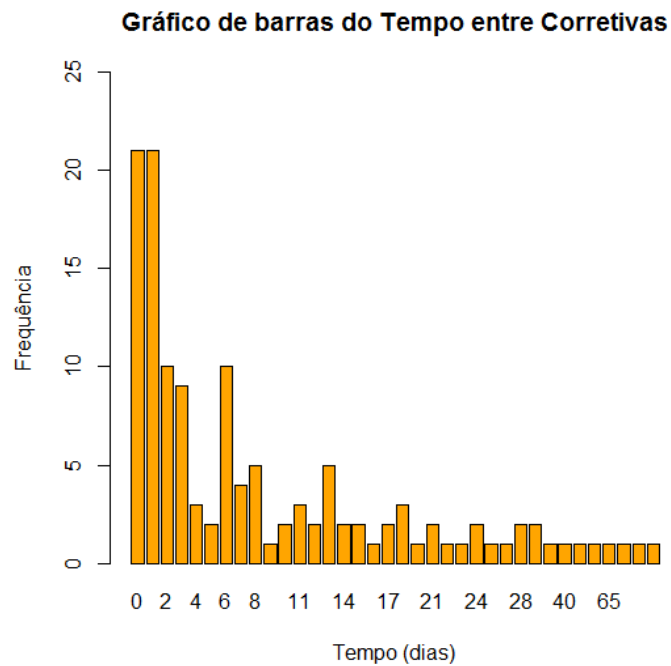


Figura 18: Gráfico de barras do tempo entre intervenções

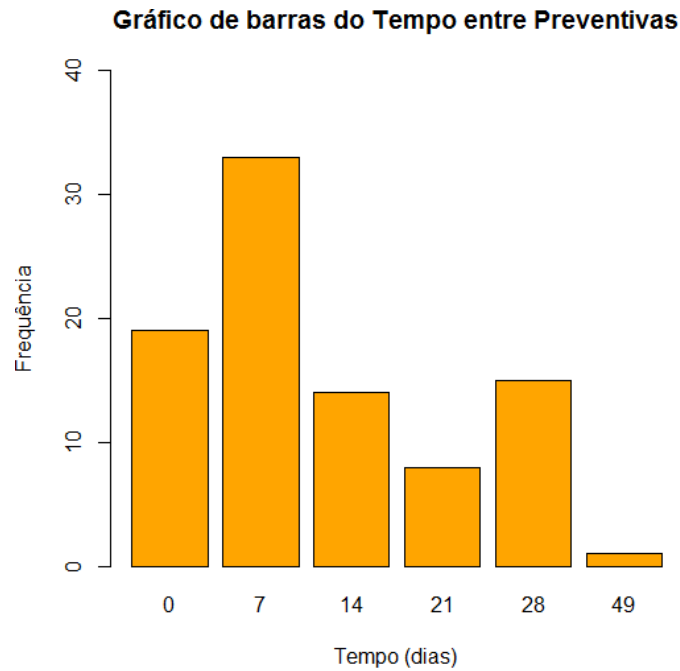


Figura 19: Gráfico de barras do tempo entre intervenções preventivas.

Estes gráficos de barras comprovam o que foi atrás afirmado em relação ao número de avarias nesta máquina. Na Figura 18 vê-se que as avarias ocorrem praticamente todas muito próximas umas das outras e que são raras as vezes em que a máquina passa algum tempo sem apresentar este tipo de ocorrências. A Figura 19 comprova que são poucas as formas distintas de aplicar intervenções preventivas e que o número destas é bastante reduzido.

Resta analisar o que acontece no gráfico da trajetória do processo $R(t)$, para apresentar as devidas recomendações.

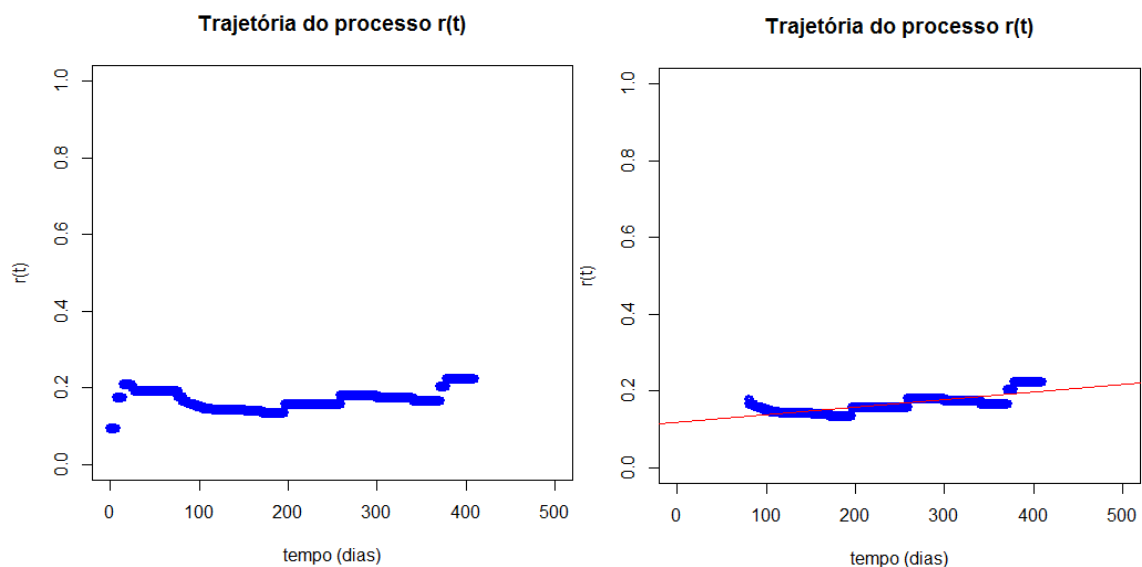


Figura 20: Gráficos da trajetória do processo $R(t)$.

Aqui, a reta de regressão obtida é $y = 2.001 \times 10^{-4}x + 0.1170$. Embora a reta ajustada seja crescente (mesmo que o seu declive não seja acentuado), ela situa-se muito próxima da base do referencial. Isto significa exatamente que, apesar de existirem melhorias ao longo do tempo, no plano de prevenção aplicado a esta máquina, ele não é suficiente para impedir a ocorrência de tantas avarias de prioridade zero.

Conclui-se, assim, que o número de avarias com perda de produção nesta máquina é realmente muito superior ao número de intervenções preventivas.

A recomendação aqui feita é de que é de extrema necessidade tomar uma maior atenção e cuidados preventivos a esta máquina. Pode ver-se nos gráficos apresentados em Anexos XVII, XVIII, XIX, XX e XXI, que o comportamento de todas as máquinas que maquinam coletores, à exceção da máquina nº 2227, é praticamente idêntico ao comportamento desta máquina. Através da análise feita à máquina nº 2227, que será apresentada mais à frente, e uma vez que ambas maquinam coletores, é sugerido que nesta se apliquem intervenções preventivas similares às da máquina nº 2227.

4.3.3 Máquina nº 2123

O gráfico da figura seguinte relaciona os tempos sem intervenções com os tempos entre intervenções preventivas para a Máquina nº 2123.

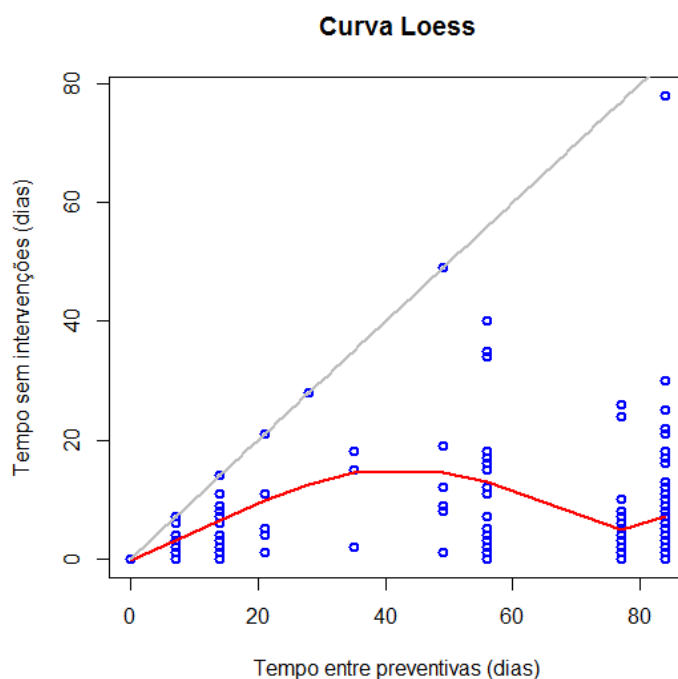


Figura 21: Curva *loess* (a vermelho) ajustada aos dados da máquina nº 2123, quando se analisa os tempos sem intervenções entre preventivas consecutivas. A reta a cinzento corresponde à não ocorrência de intervenções corretivas entre duas preventivas consecutivas.

Como acontece com a máquina nº 2102, também para os dados da máquina nº 2123 se encontram pontos sobre a reta a cinzento, o que é favorável visto que existem casos em que não há avarias entre intervenções preventivas.

A curva a vermelho encontra-se inicialmente próxima da reta, afastando-se ligeiramente até ao momento em que as intervenções preventivas são espaçadas de 35 dias. Para intervenções preventivas com um intervalo entre elas superior a 35 dias, a curva afasta-se abruptamente da reta, e observa-se o aparecimento de muitos pontos no gráfico, pontos estes que representam as avarias ocorridas.

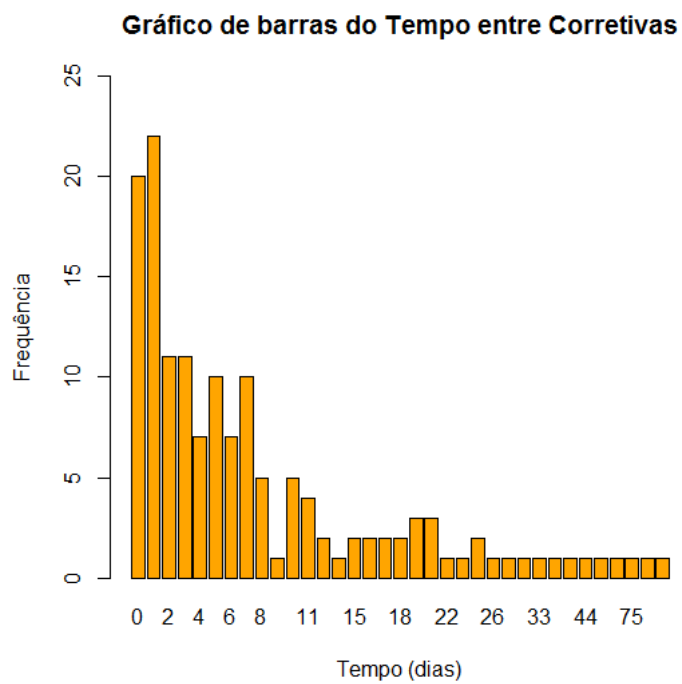


Figura 22: Gráfico de barras do tempo entre intervenções corretivas.

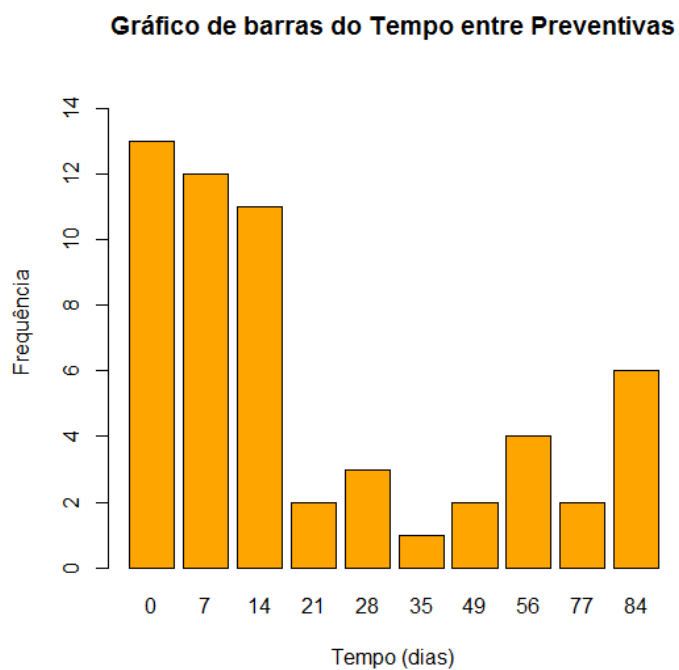


Figura 23: Gráfico de barras do tempo entre intervenções

No gráfico de barras da Figura 22 vê-se, na primeira barra vertical, que existe uma grande quantidade de avarias com um pequeno intervalo de tempo entre elas. A maior parte destas avarias correspondem aos numerosos pontos que se encontra no gráfico da Figura 21, quando as preventivas são espaçadas por mais de 35 dias.

Pelo gráfico de barras da Figura 23 é visível que o número de intervenções preventivas com poucos dias de intervalo entre elas é relativamente elevado. No entanto, existem várias barras no gráfico de barras que evidenciam uma considerável variabilidade no plano de prevenção, o que pode tornar irregular o comportamento da máquina em relação às avarias.

No gráfico seguinte pode ver-se de que forma está a evoluir o número de intervenções preventivas e corretivas de prioridade zero ao longo do tempo.

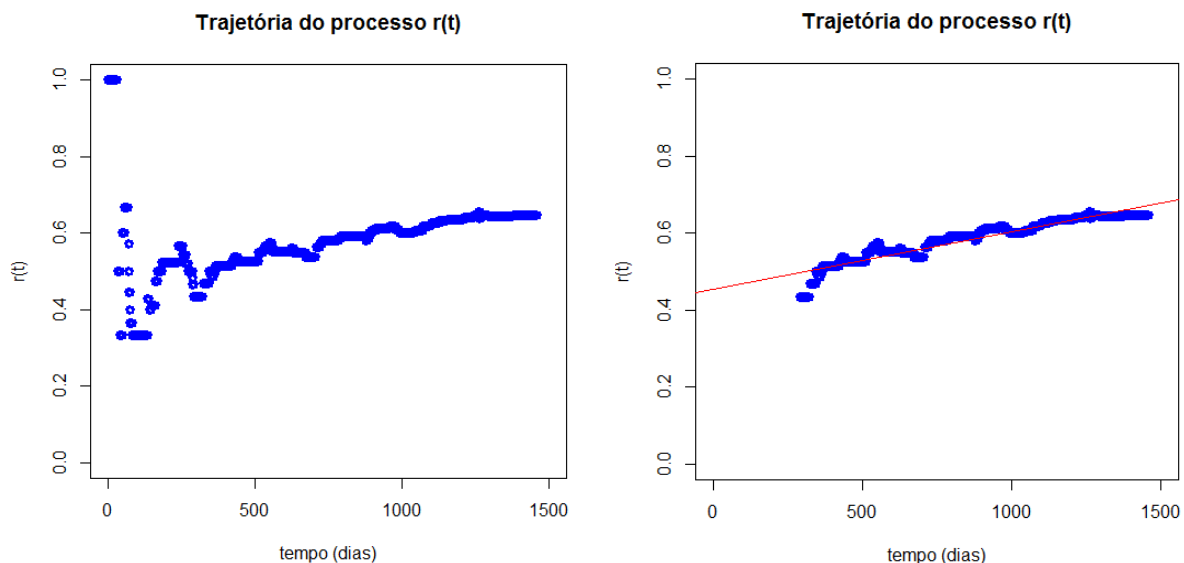


Figura 24: Gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Nota-se agora uma reta ajustada crescente com maior declive do que as observadas anteriormente, em que a reta ajustada é estimada por: $y = 1.495 \times 10^{-4}x + 0.4543$. Isto significa que, de entre as 3 máquinas já

analisadas, esta é a que destaca uma maior melhoria no plano de prevenção. O processo $R(t)$ toma valores próximos de 0.4 e vai tomando valores cada vez maiores ultrapassando o valor de 0.6. Ora, tal significa que com a melhoria já feita no plano de prevenção aplicado, a percentagem de avarias com perda de produção nesta máquina diminuiu cerca de 20% nos últimos 4 anos.

No gráfico de barras do tempo decorrido entre intervenções preventivas verificou-se alguma variabilidade nos intervalos de tempo de aplicação das mesmas. Então, comprovada pelo último gráfico a melhoria no plano de prevenção, presume-se que atualmente não estejam a ser aplicadas intervenções preventivas espaçadas por um grande intervalo de tempo.

O que se pode afirmar sobre o plano preventivo desta máquina é que, não sendo o ótimo, ele tem melhorado de forma progressiva e o número de intervenções preventivas tem aumentado retirando lugar às avarias com perda de produção. Deve, no entanto, ter-se o cuidado de fazer intervenções preventivas separadas de, no máximo, 35 dias. Com certeza assim se veria uma reta ajustada mais próxima do topo do referencial, significando um menor número de avarias deste tipo.

Doravante, e por uma questão de simplicidade, apresenta-se para as restantes máquinas, o mesmo tipo de análise feito anteriormente mas agora apresentando apenas os gráficos referentes à curva *loess* e à trajetória do processo $R(t)$, já sem cerca de 20% das observações iniciais. Os gráficos de barras correspondentes estarão presentes nos anexos indicados. Esta apresentação estará feita de acordo com o tipo de peça maquinado, iniciando-se a análise pelas máquinas que fazem o processo de maquinação de bombas de óleo, seguindo-se os suportes de injetores e por fim os coletores.

4.4 Análise de resultados para as restantes máquinas

4.4.1 Análise a máquinas que maquinam bombas de óleo

4.4.1.1 Máquina nº 2112

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2112.

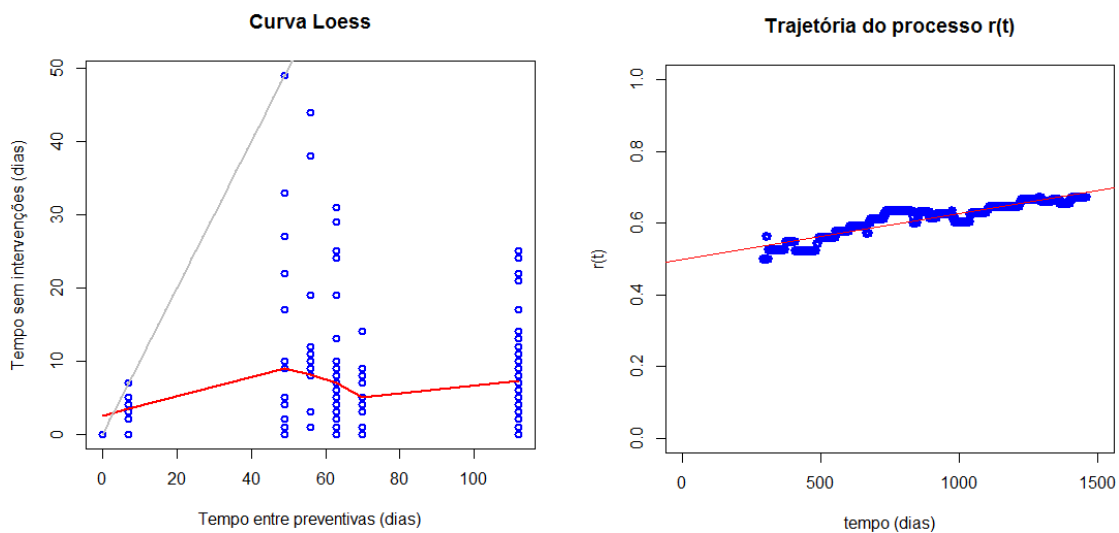


Figura 25: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

No gráfico da curva *loess* pode-se observar uma curva que se afasta progressivamente da reta a cinzento, o que evidência que intervalos entre intervenções preventivas superiores a 40 dias são prejudiciais para a máquina. Vê-se também que para essas preventivas surge um elevado número de avarias.

No gráfico da direita da Figura 25, vê-se uma trajetória crescente. A reta ajustada tem declive positivo e situa-se ligeiramente acima da parte central do referencial. O que se pode afirmar é que tem havido evolução do plano de manutenção preventivo aplicado sobre esta máquina a

nível da intervenções corretivas de prioridade zero. Consequentemente, o afastamento da curva *loess* da reta $y = x$ sugere que, durante as intervenções preventivas espaçadas por mais de 40 dias, que se visualizam no gráfico da esquerda, há mais corretivas e estas serão mais provavelmente de outro tipo que não de prioridade zero. A tendência crescente da reta de regressão estimada por $y = 1.287 \times 10^{-4}x + 0.4980$ que se observa no gráfico da direita, leva a crer que, no presente, o plano preventivo aplicado é razoável para evitar corretivas de prioridade zero.

Por fim, sugere-se que, uma vez que no gráfico da esquerda da Figura 25 não se observam intervenções preventivas espaçadas por mais de 7 e menos de 50 dias, sensivelmente, sejam aplicadas preventivas espaçadas de no máximo 21 dias durante um período de experimentação e que se repita novamente o estudo para esta máquina, por forma a concluir qual o melhor plano de prevenção para este caso.

4.4.1.2 Máquina nº 2113

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2113.

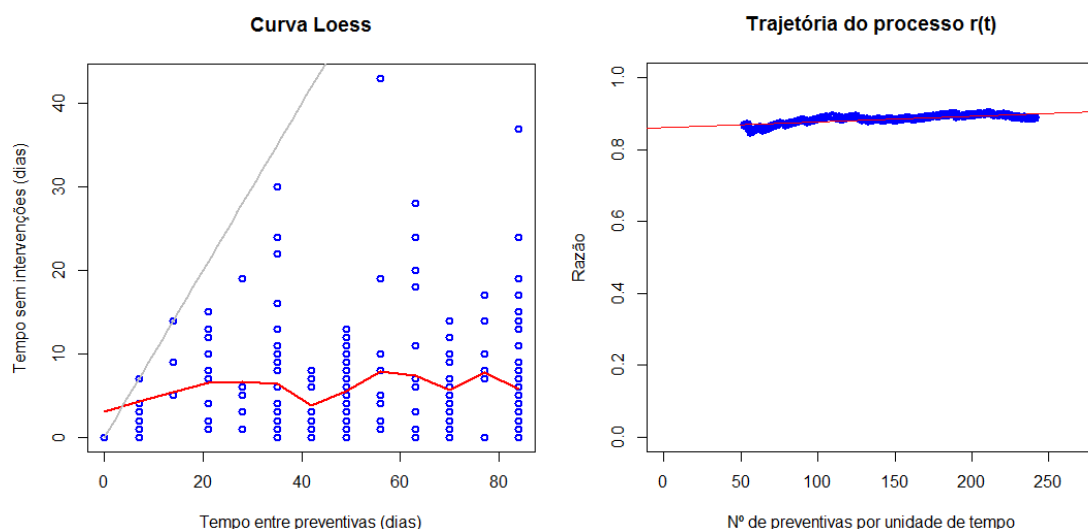


Figura 26: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

O gráfico da esquerda da Figura 26 evidencia uma curva *loess* que se afasta progressivamente da reta $y = x$ e, mostra também que, há uma grande variabilidade na forma como as intervenções preventivas são aplicadas. Pensa-se que o elevado número de avarias nesta máquina, é provocado pela variabilidade na forma como o plano preventivo é aplicado (existem diferentes tempos entre prevenções).

A construção da curva *loess* é assim influenciada por estes inúmeros pontos. O gráfico da direita da Figura 26 mostra que, apesar do elevado número de avarias na máquina, estas não são avarias que implicam perda de produção. A trajetória apresentada toma sempre valores superiores a 0.8 e, por isso, se conclui que mais de 80% das vezes em que a máquina é parada para fazer intervenções, estas são de caráter preventivo.

Conclui-se que esta é uma máquina na qual devem ser feitas alterações ao plano preventivo para reduzir as intervenções corretivas de prioridade diferente de zero. É importante melhorar o aspeto da curva *loess*, eventualmente aplicando preventivas menos variadas no tempo. Isto fará com que a máquina tenha um comportamento mais regular, com menos avarias daqueles tipos e com um melhor nível de funcionamento. Propõe-se que as intervenções preventivas espaçadas por 7, 14 e 21 dias sejam aplicadas mais frequentemente tirando lugar às intervenções preventivas espaçadas por tempos superiores a estes.

4.4.1.3 Máquina nº 2115

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2115.

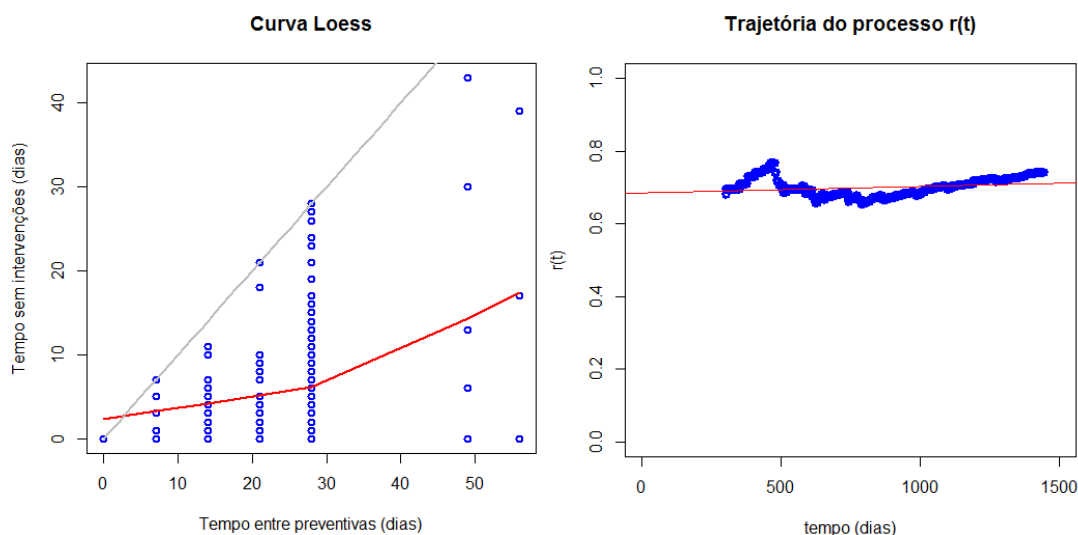


Figura 27: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Para a presente máquina pode observar-se uma curva *loess* com aspeto linear até preventivas espaçadas até 28 dias, mas com declive muito baixo indiciando que o aumento do tempo entre preventivas, até 28 dias, conduz a um aumento de intervenções corretivas. O tempo entre corretivas é bastante variável sendo o tempo médio baixo. As preventivas são aplicadas com um espaço de tempo entre elas de 0, 7, 14, 21, 28, 49 ou 58 dias, embora que os últimos pontos não tenham um peso tão importante para a avaliação do desempenho da máquina, uma vez que essas observações são em reduzido número, como se verifica no gráfico de barras do tempo entre preventivas, no Anexo VIII. A reta ajustada à trajetória é estimada por $y = 3.938 \times 10^{-5}x + 0.6810$ demonstra que, ao longo do tempo, o plano preventivo tem refletido algumas melhorias, ainda que ligeiras e que o número de intervenções

preventivas é consideravelmente superior ao número de paragens da máquina por avarias.

Aqui pode ser feita uma conclusão análoga à anterior, visto que a curva *loess* e a trajetória do processo $R(t)$ apresentam as mesmas características. Sugere-se assim a aplicação de preventivas com intervalos de 7, 14 ou 21 dias, evitando preventivas intervaladas de 28 dias ou mais. Note-se que quando as preventivas são espaçadas de 28 dias, surgem mais avarias e com um menor espaço de tempo entre elas, como se verifica no gráfico da esquerda da Figura 27.

4.4.1.4 Máquina nº 2119

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2119.

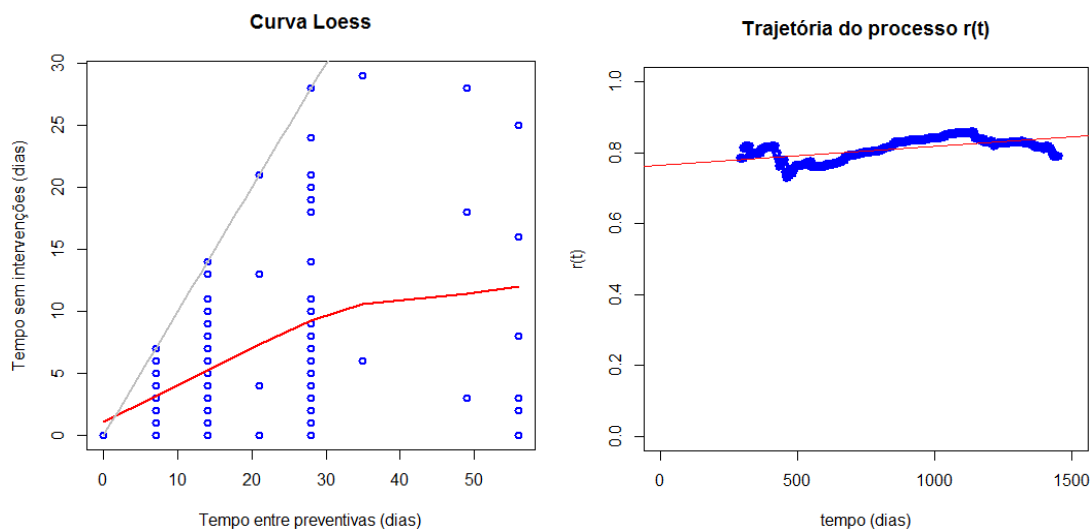


Figura 28: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Embora a curva *loess* aqui representada não assuma um afastamento da reta a cinzento tão evidente como nas duas últimas máquinas analisadas, verifica-se que existiram ao longo dos 4 anos vários intervalos diferentes para a aplicação de intervenções preventivas e que,

em particular, no caso destas serem intervaladas de 14 ou 28 dias o número de avarias é elevado. Repare-se também que o facto de, para preventivas espaçadas de 21 dias, não existirem pontos no gráfico que denunciem um relativo aumento de avarias, este acontecimento justifica-se pelas raras vezes em que foram aplicadas preventivas assim intervaladas. Basta ver o gráfico de barras do tempo entre preventivas, no Anexo IX, para perceber esta situação. Tal não significa que o plano de prevenção não possa ser melhorado.

No gráfico da direita vê-se uma reta ajustada com a expressão $y = 5.452 \times 10^{-5}x + 0.7638$ que denuncia um declive positivo, e é visível também que os últimos valores desta trajetória tendem a situar-se abaixo da reta de ajuste. O que se pode afirmar, com apoio no gráfico da direita, é que, ao longo do tempo, o plano preventivo tem sofrido ligeiras melhorias, no entanto, parece ter existido um "descuido" em relação ao mesmo num passado recente.

Para esta máquina sugere-se uma intervenção preventiva com um período de 7 dias, visto que para intervenções preventivas espaçadas por 14 dias o número de avarias registado é considerável. No entanto, pode ser feito durante um período experimental, uma alternância entre intervenções preventivas espaçadas de 7 e 14 dias, desde que se evitem as preventivas intervaladas por tempos superiores a estes.

4.4.1.5 Máquina nº 2223

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2223.

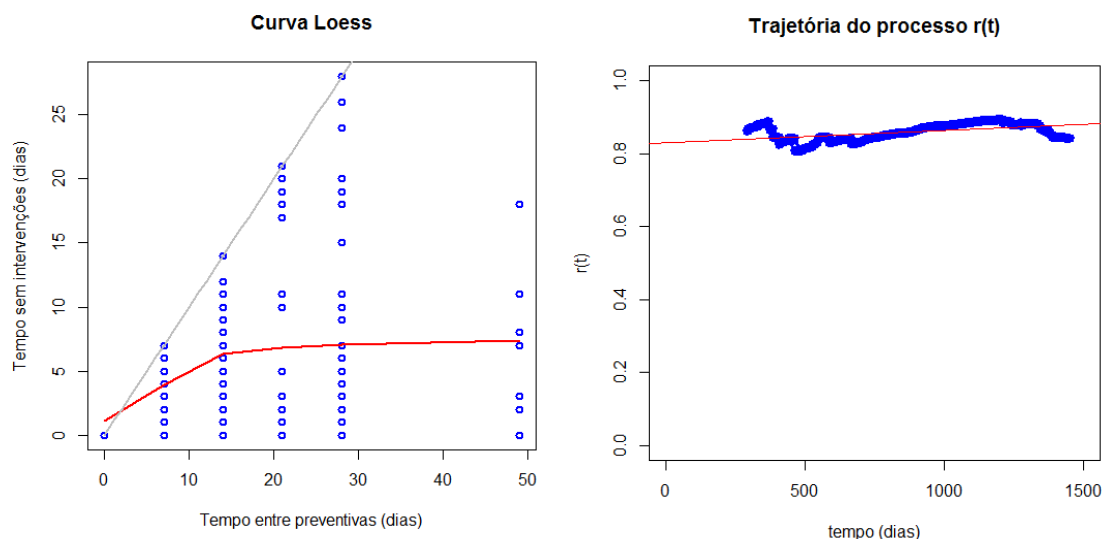


Figura 29: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Relativamente a esta máquina observam-se gráficos semelhantes aos anteriores, portanto as afirmações e sugestões feitas anteriormente são na maior parte idênticas. A reta ajustada à trajetória mantém-se sempre muito perto do topo do referencial e com um ligeiro declive positivo. Tal sugere, como já visto, que o número de intervenções preventivas consegue ser bastante superior ao número de intervenções corretivas de prioridade zero. Porém, este elevado número de prevenções não está a ser impeditivo ao aparecimento de avarias. Pode especular-se que este facto acontece provavelmente devido à presença da variabilidade na forma como é aplicada a manutenção preventiva, pois está a fazer com que a máquina não seja estável na resposta às preventivas. No gráfico da curva *loess*, verifica-se um afastamento progressivo desta em relação à reta a cinzento a partir do momento em que as intervenções preventivas são intervaladas por mais de 14 dias.

Portanto, as sugestões que são dadas são as mesmas que para a máquina anterior.

4.4.2 Análise às máquinas que maquinam suporte de injetores

4.4.2.1 Máquina nº 2101

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2101.

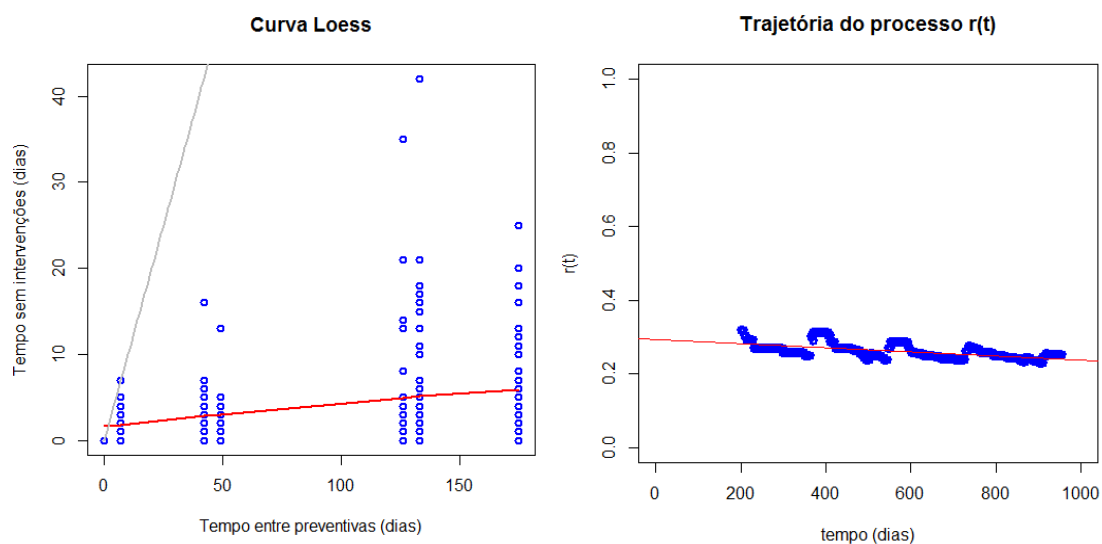


Figura 30: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

No gráfico da esquerda observa-se que a curva *loess* se parece mais com uma reta, afasta-se de uma forma muito acentuada, da reta a cinzento. Isto sugere que o plano de manutenção preventivo é inadequado. As intervenções preventivas são demasiadamente espaçadas no tempo (em alguns casos são de espaçadas por mais de 3 meses) e são também em reduzido número, como se pode provar pelo Anexo XI, as avarias são em grande número e muito próximas umas das outras.

No gráfico da direita vê-se que a reta ajustada tem um declive negativo (embora que próximo do valor nulo) e situa-se próxima da base do referencial. O que pode ser afirmado depois de analisar estes dois gráficos é que a maior parte das intervenções de manutenção que conduzem à perda de produção desta máquina são de caráter corretivo (de prioridade zero) e que as intervenções de caráter preventivo são exageradamente distantes no tempo. De acordo com os dados recolhidos, estes gráficos são correspondentes ao funcionamento da máquina apenas nos 3 últimos anos, não estando disponíveis os dados relativos ao ano de 2009. Por observação dos dados, sabe-se que desde 2010 que esta máquina tem um funcionamento contínuo, e portanto, os intervalos de tempo entre as intervenções preventivas não foram provocados por um eventual período de tempo de inatividade opcional da máquina. Assim sendo, conclui-se que o plano de prevenção aplicado nesta máquina é inadequado e as sugestões para o mesmo serão aplicadas mais à frente quando se avaliarem os funcionamentos das restantes máquinas que maquinam o mesmo tipo de peça.

4.4.2.2 Máquina nº 2114

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2114.

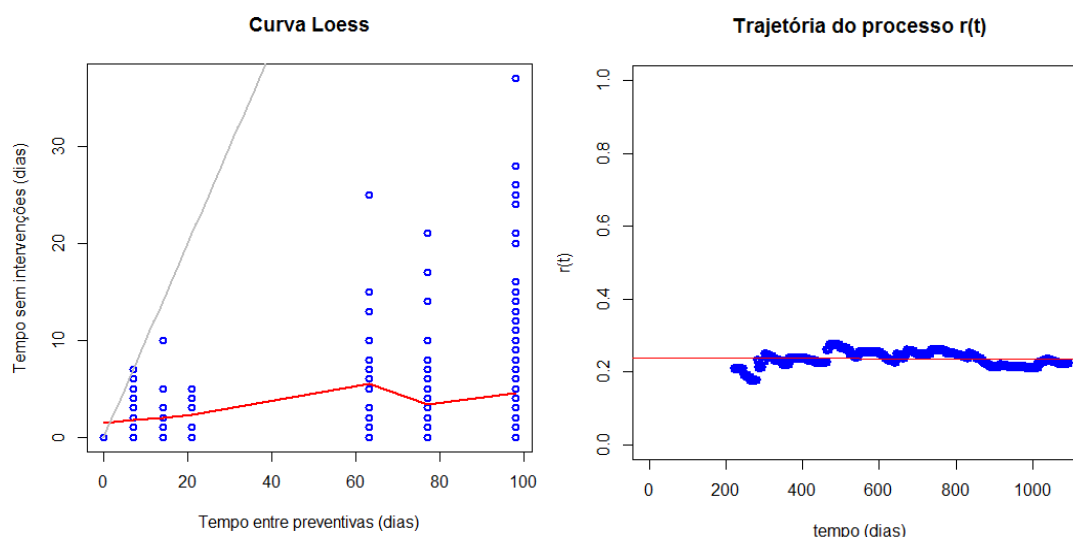


Figura 31: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

A observação destes dois gráficos permite afirmar que o comportamento desta máquina é semelhante ao da máquina anterior. As intervenções preventivas são escassas e, por este motivo, eventualmente, o número de avarias torna-se elevado, principalmente quando o tempo decorrido entre intervenções preventivas aumenta. A curva *loess*, assim como no caso anterior, afasta-se progressivamente da curva a cinzento, o que evidencia um baixo nível de desempenho da máquina. O gráfico da trajetória indica ainda, que o plano preventivo tem se mantido constante ao longo dos 4 anos, e a posição da reta ajustada indica que o número de intervenções corretivas de prioridade zero é bastante superior ao número de intervenções preventivas.

As sugestões sobre um plano de manutenção adequado para esta máquina serão expostas um pouco mais à frente juntamente com as sugestões para a máquina anterior.

4.4.2.3 Máquina nº 2249

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2249.

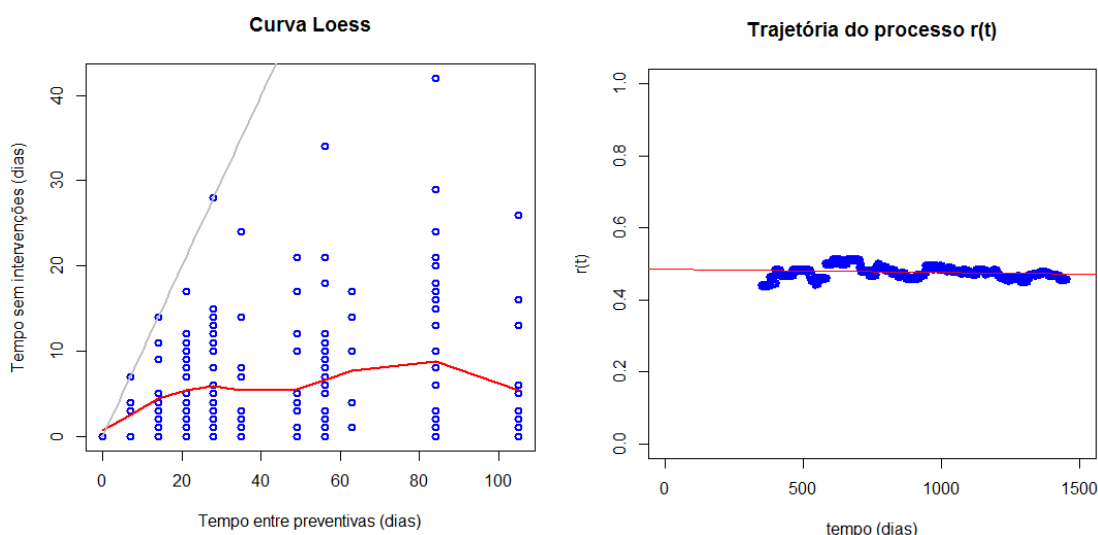


Figura 32: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Embora esta máquina também machine suporte de injetores como as duas máquinas anteriores, verifica-se que, a curva *loess* se afasta de forma tão abrupta da reta a cinzento para tempos entre preventivas mais baixos, e nem a reta ajustada à trajetória do processo se situa tão próxima da base do referencial como nos casos anteriores. No gráfico da esquerda, a forma como as intervenções preventivas são aplicadas é bastante diferente. Aqui, embora existam ainda intervenções preventivas bastante espaçadas no tempo, existem mais intervenções com intervalos de tempo entre elas mais curtos. Há portanto, uma vigilância mais frequente nesta máquina do que nas anteriores.

No gráfico da direita, verifica-se um ligeiro declive negativo da reta de regressão ajustada estimada por $y = -8.939 \times 10^{-6}x + 0.4836$, embora muito próximo de zero. Pode-se, ainda assim, afirmar que o plano de manutenção preventivo nesta máquina tem sido constante ao longo do

tempo e que cerca de 50% das intervenções que implicaram paragem da máquina foram intervenções para fins preventivos.

Para que se possa ainda melhorar o desempenho nesta máquina, sugere-se eliminar a realização de intervenções preventivas espaçadas por mais de 28 dias, passando a aplicar mais intervenções preventivas menos espaçadas no tempo. Isto tornará o plano preventivo mais estável e obrigará a uma maior vigilância da máquina, o que pode contribuir para a diminuição da probabilidade de ocorrência de avarias.

4.4.2.4 Máquina nº 2219

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2219.

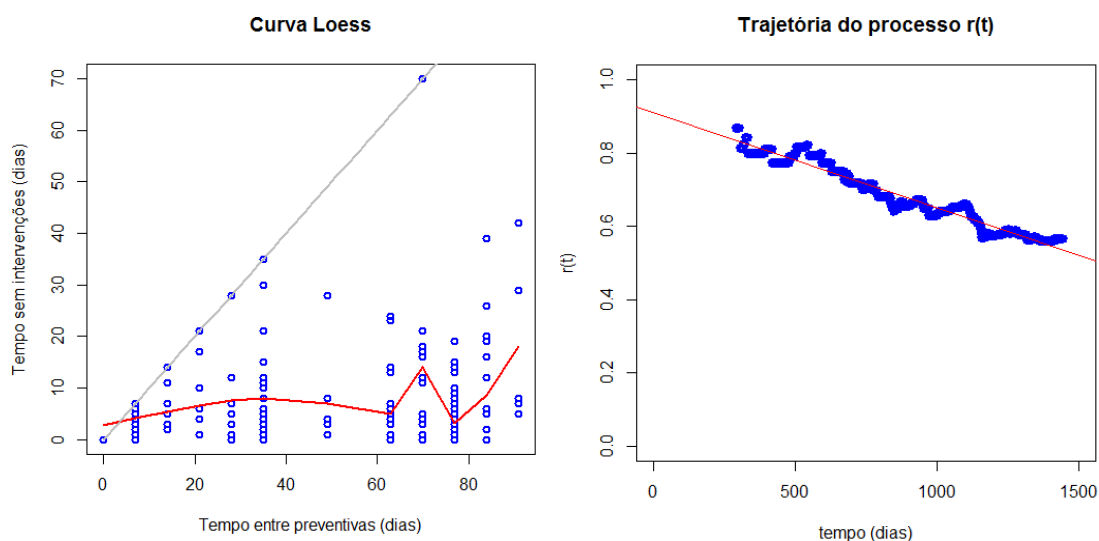


Figura 33: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

No gráfico com a curva *loess* pode ver-se que existem, principalmente nos casos em que as preventivas têm um menor intervalo de tempo entre elas, alguns pontos sobre a reta a cinzento, o que significa para preventivas aplicadas desta forma é possível que não existam avarias

entre elas. Vê-se também que para intervenções preventivas espaçadas por mais de 60 dias, o número de avarias aumenta e estas tornam-se mais frequentes. O aspeto da curva a vermelho não é satisfatório pois esta afasta-se continuamente da reta a cinzento.

No gráfico da direita observa-se uma curva ajustada com um acentuado declive negativo, como se pode ver na expressão da reta estimada por $y = -2.593 \times 10^{-4}x + 0.9095$, embora esta se mantenha relativamente afastada da base do referencial. Tal indica que tem havido, ao longo do tempo, um aumento do número de intervenções corretivas de prioridade zero, não se mostrando adequado o plano de manutenção preventivo referente a esta máquina.

Observa-se também que, esta máquina juntamente com a analisada no ponto anterior, parecem ter o mesmo tipo de plano preventivo se se reparar nos valores apresentados para os intervalos entre preventivas. No entanto, ao observar os gráficos de barras correspondentes, no Anexo XIV, é visível que para esta máquina o número de intervenções preventivas com um menor intervalo de tempo entre elas é mais reduzido que na máquina anterior e observa-se, também, que para esta máquina as avarias ocorrem com menores intervalos entre elas.

Sugere-se, para esta máquina, aplicar intervenções preventivas espaçadas de, no máximo, 28 dias, eliminando intervenções preventivas com um intervalo entre elas maior do que este. Este plano deve ser feito durante um período experimental para que se possam repetir novamente estes estudos e ver se há melhorias nos resultados.

4.4.2.5 Máquina nº 2220

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2220.

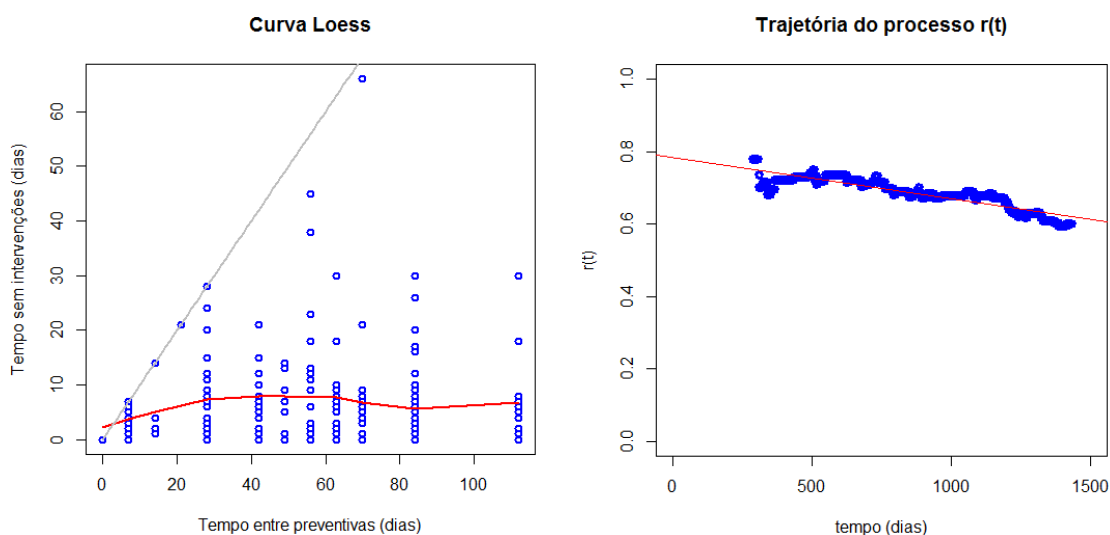


Figura 34: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Para esta máquina é visível a semelhança dos seus gráficos com os gráficos da máquina anterior. Neste caso também se observam pontos sobre a reta a cinzento quando as preventivas são espaçadas de, no máximo, 28 dias. Verifica-se também um elevado número de avarias pouco espaçadas entre elas, quando as preventivas são espaçadas por mais de 40 dias e por isso, a curva *loess* também se afasta progressivamente da reta a cinzento.

No gráfico da direita, observa-se também uma reta ajustada e estimada por $y = -1.131 \times 10^{-4}x + 0.7829$, com um acentuado declive negativo embora que ainda se mantenha afastada da base do referencial. Conclui-se que, nesta máquina assim como na anterior, o plano preventivo já foi mais cuidado em anos anteriores mas que tem vindo a sofrer alterações prejudiciais para o funcionamento destas.

Posto estes factos, a sugestão dada para este caso é exatamente a mesma que na máquina anterior.

4.4.2.6 Máquina nº 2250

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2250.

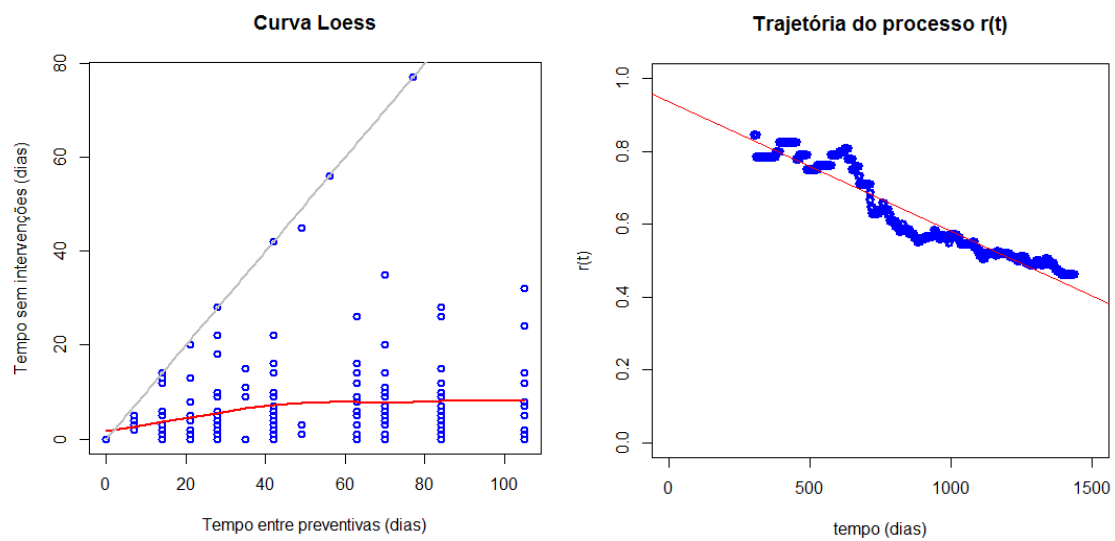


Figura 35: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Mais uma vez, se verificam gráficos para esta máquina muito semelhantes aos anteriores. No entanto, verifica-se no gráfico da direita que o declive da reta ajustada é ainda mais acentuado do que no caso das máquinas anteriores, significando que a proporção de avarias com perda de produção aumenta mais rapidamente. Quer no gráfico da curva *loess*, quer no gráfico de barras do tempo entre intervenções corretivas do Anexo XVI, se verifica um grande número de avarias e muito próximas, no tempo, umas das outras. O plano de prevenção é bastante deficitário neste caso e por isso é revelado um mau funcionamento da máquina.

Sendo uma máquina que se considera necessitar de uma atenção especial por parte da equipa de manutenção, é sugerido que se façam intervenções preventivas intervaladas por, no máximo 21 dias, isto para que se recupere a estabilidade do seu funcionamento. Depois disto, será necessário repetir a sua avaliação e decidir se se pode aumentar o intervalo entre intervenções preventivas.

Em relação às máquinas nº 2101 e nº 2114, foi dito anteriormente que se fariam mais adiante sugestões para os respetivos planos de manutenção preventiva, depois de se observar o comportamento para todas as máquinas que maquinam suporte de injetores. Isto porque os gráficos da curva *loess* não eram esclarecedores quanto à melhor forma para aplicar esse plano. Agora, comparando com as restantes máquinas, sugere-se que as intervenções preventivas devem ser espaçadas de, no máximo, 28 dias. Não é certo que este seja o melhor plano de prevenção a aplicar nestas duas máquinas. Sugere-se um plano de prevenção desta forma mas, sugere-se ainda, que no final de um período de, por exemplo, um ano, se repita o estudo apresentado por forma a concluir se este plano se adequa ou se será necessário fazer alterações no mesmo.

4.4.3 Análise às máquinas que maquinam coletores

4.4.3.1 Máquina nº 2116

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2116.

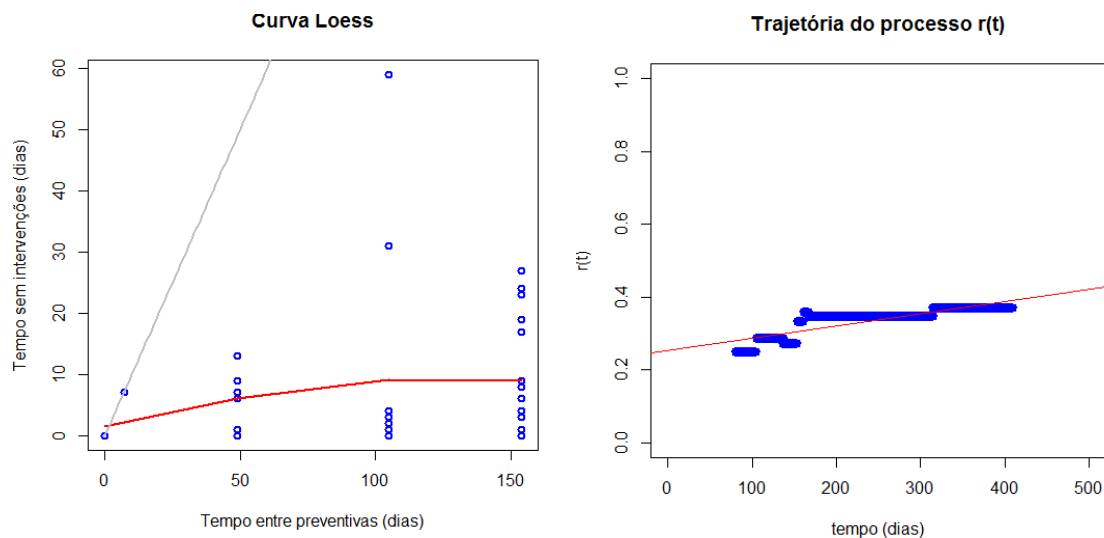


Figura 36: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Perante os gráficos apresentados, pode-se afirmar que o plano de prevenção nesta máquina tem demasiadas deficiências. Vê-se pelo gráfico da esquerda, que são muito poucas as formas de intervir preventivamente na máquina e que essas formas não são de todo adequadas. Observa-se que são feitas intervenções preventivas espaçadas por cerca de 100 dias, e isto representa quase $\frac{1}{3}$ do ano em que não se aplica uma intervenção preventiva na máquina. E existem ainda casos em que a máquina está perto de 5 meses sem receber intervenção deste tipo. Embora neste gráfico se façam notar poucos pontos, tal não significa que as avarias foram em reduzido número, pois

ao analisar o gráfico de barras do tempo entre corretivas, se verifica que são muitas as avarias e que existem maioritariamente avarias no mesmo dia. Esses pontos não se evidenciam no gráfico pelo facto de se encontrarem sobrepostos. É notório também o declive positivo da reta de regressão $y = 3.555 \times 10^{-4}x + 0.9366$ ajustada à trajetória, o que revela que o número de intervenções preventivas tem ganho lugar ao número de intervenções corretivas de prioridade zero. Estes factos podem sugerir que as preventivas espaçadas por mais de 100 dias façam parte do passado do plano de manutenção preventivo. É possível também observar no gráfico da direita, que o plano preventivo parece evidenciar 3 fases distintas (de crescimento), sendo que a última mostra uma melhoria em relação à anterior, e esta evidencia também uma melhoria do plano preventivo em relação à primeira fase. Ainda assim, esta é uma reta que se situa mais próxima da base do referencial, evidenciando um desempenho da máquina que não é satisfatório.

Considera-se que, neste caso, não existe informação suficiente para que se possam fazer sugestões ao plano de manutenção preventivo para esta máquina, pelo que, estas serão apresentadas mais à frente, depois de se analisarem todas as máquinas que maquinam coletores.

4.4.3.2 Máquina nº 2222

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2222.

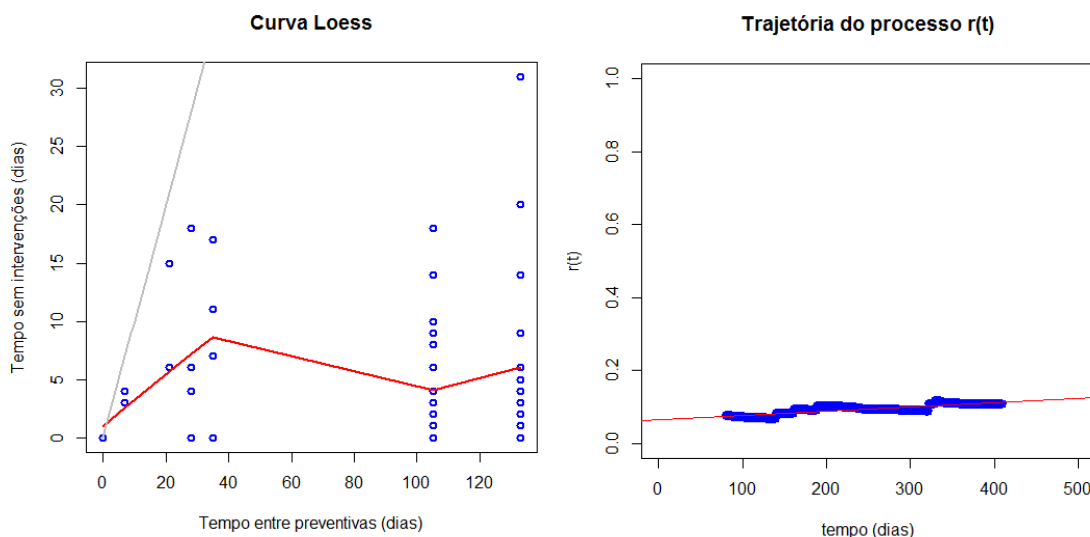


Figura 37: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Para esta máquina observa-se uma curva *loess* relativamente convergente com a reta a cinzento até ao momento em que as intervenções preventivas são espaçadas por cerca de 35 dias. Depois diverge da reta $y = x$. Pode confirmar-se pelo gráfico de barras do tempo entre corretivas apresentado no Anexo XVIII que existem muitas avarias pouco espaçadas no tempo e, por isso, no gráfico da curva *loess* não se visualizam um elevado número de pontos uma vez que estão sobrepostos. Será também por este motivo que a curva *loess* estimada não se encontra em posição mais convergente com a reta a cinzento.

O que se pode ver no gráfico da direita é que a reta ajustada tem um ligeiro declive positivo mas que se encontra demasiadamente próxima da base do referencial. Significa portanto que, embora tenham havido uma pequena melhoria no plano de prevenção, o número de intervenções corretivas com perda de produção continua a ser muito superior ao número de intervenções preventivas.

Uma sugestão para o plano de manutenção a ser aplicado nesta máquina, será apresentado adiante.

4.4.3.3 Máquina nº 2221

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2221.

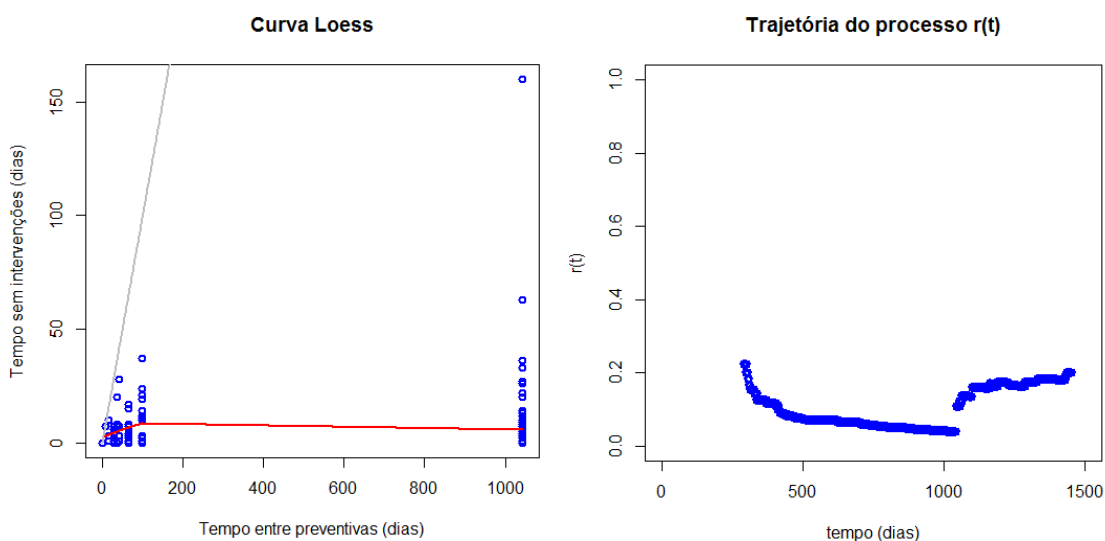


Figura 38: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Para esta máquina verifica-se, pelo gráfico da esquerda, que existiu um período de cerca de quase 3 anos em que quase não foram aplicadas intervenções de manutenção preventiva nesta máquina. Depois de se verificarem os dados, sabe-se que esse período corresponde ao período entre Janeiro de 2009 e Novembro de 2011. Este é a razão para a curva apresentar este aspeto. Verificou-se também nos dados, que no ano de 2012 o número de preventivas foi igual ao número de preventivas aplicado nos 3 anos anteriores, daí se notar uma grande diferença, no gráfico da direita, da trajetória do processo $R(t)$. Para esta máquina considerou-se desadequado o ajuste de uma reta de regressão à trajetória apresentada. Isto porque se verificam duas fases da trajetória

completamente distintas, em que na primeira, se ajustaria uma reta com declive negativo e, na segunda, uma reta com declive positivo. Isto deve-se ao facto, já enunciado, de que houve um grande período de tempo em que não foram aplicadas intervenções preventivas. E que, a fase da trajetória em que se ajustaria uma reta com declive positivo, corresponde ao plano preventivo aplicado no ano de 2012. No entanto, a quantidade de intervenções corretivas continua a ser muito superior à de intervenções preventivas.

Conclui-se que esta é uma máquina que, neste momento, deve apresentar demasiados problemas e, assim sendo, é uma máquina que necessita de cuidados acrescidos para que possa ser possível colocá-la num nível de funcionamento razoável.

Sugestões para um plano preventivo serão ditadas adiante.

4.4.3.4 Máquina nº 2227

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2227.

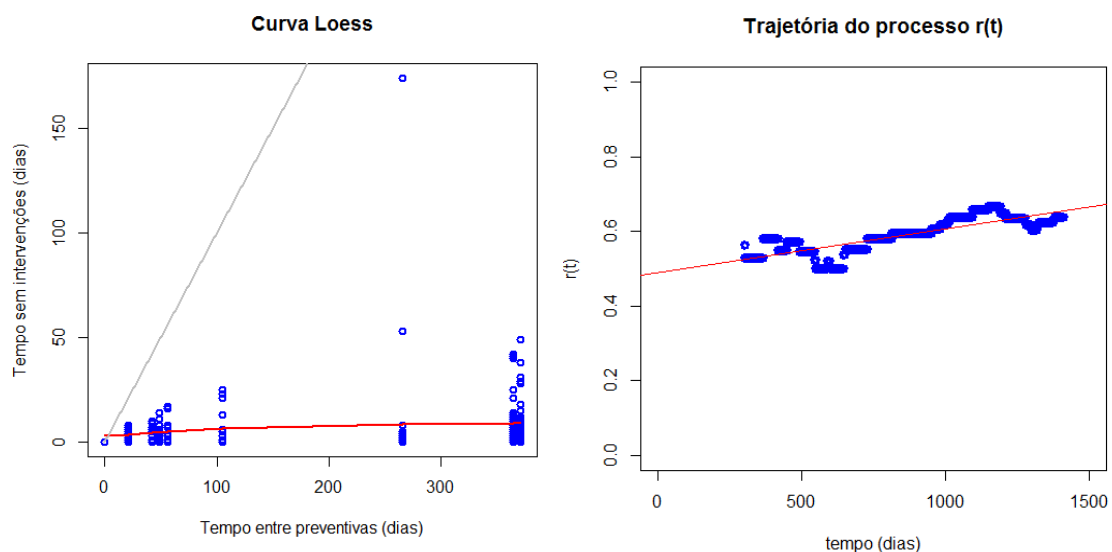


Figura 39: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

Para esta máquina observa-se uma curva *loess* semelhante à anterior, no entanto, no gráfico da direita vê-se uma reta ajustada com declive positivo relativamente elevado e uma posição no referencial ligeiramente acima do valor de 0.5. Estes factos levam a entender que a construção curva *loess* apresentada está a ser bastante influenciada por planos preventivos passados e que, não traduz, na atualidade, o desempenho da máquina. No entanto, verifica-se pelo gráfico de barras do tempo entre preventivas do Anexo XX, que são variados os intervalos de tempo entre intervenções preventivas e que, se esta situação corresponder à atualidade, as intervenções preventivas intervaladas por mais dias devem ser evitadas por forma a ter um comportamento mais regular da máquina. Nesse mesmo anexo, o gráfico de barras do tempo entre intervenções corretivas mostra que há grande variabilidade nos tempos entre avarias, e também que existem muitas avarias muito próximas umas das outras. Tal evidencia um funcionamento da máquina um pouco irregular.

Sugestões para um plano de manutenção preventivo serão feitas adiante.

4.4.3.5 Máquina nº 2117

Nos gráficos seguintes relacionam-se os tempos entre preventivas e sem intervenção e a trajetória do processo $R(t)$ para a Máquina nº 2117.

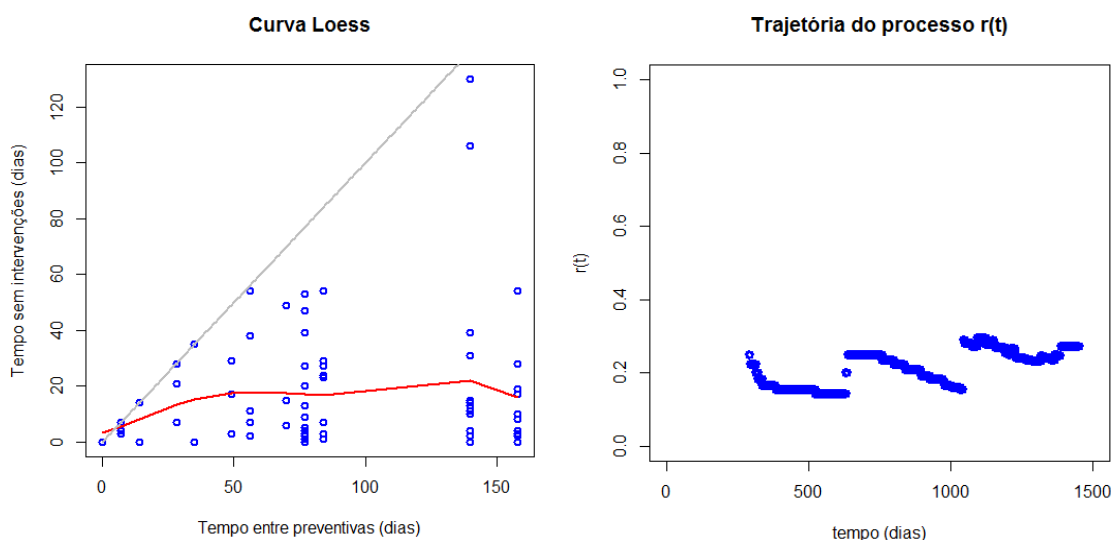


Figura 40: Gráfico da curva loess e gráfico da trajetória do processo $R(t)$.

O que se verifica neste dois gráficos, é que para esta máquina a curva *loess* se mantém "próxima" da reta a cinzento até ao momento em que as intervenções preventivas são espaçadas de, sensivelmente, 30 dias e que depois a curva *loess* diverge da reta a cinzento. Vê-se também neste gráfico que as avarias são inúmeras e muito próximas, no tempo, umas das outras. Este facto pode também ser confirmado pelo gráfico de barras do tempo entre corretivas apresentado no Anexo XXI. Verifica-se também, no gráfico da esquerda, que são várias também as formas diferentes de se aplicarem intervenções preventivas nesta máquina.

Tal como foi feito para a máquina nº 2221, aqui também se decidiu não ajustar uma reta de regressão à trajetória apresentada, pelo mesmo motivo de se verificarem, neste caso, 3 fases distintas no plano de prevenção aplicado. Em cada uma dessas 3 fases se nota um trajeto decrescente, o que representa uma ineficiência do plano de prevenção. Por ordem crescente das fases, verifica-se que existe um aumento do

valor médio de $R(t)$. Mas mesmo assim, a posição da trajetória mantém-se próxima da base do referencial. Embora tenham existido algumas melhorias no desempenho da máquina, o número de intervenções corretivas com perda de produção continua bastante superior ao número de intervenções preventivas.

A sugestão para um plano de prevenção para esta máquina será apresentado de seguida, juntamente com as sugestões para todas as restantes máquinas que maquinam coletores.

Depois de analisados os gráficos para todas as máquinas que maquinam coletores, é possível afirmar que nenhuma delas apresenta uma curva *loess* com a aparência desejada, e que os gráficos das trajetórias evidenciam sempre que o número de intervenções corretivas com prioridade zero nas respetivas máquinas, é bastante superior ao número de intervenções preventivas aplicadas nas mesmas.

Note-se que, os coletores são peças em ferro fundido e que as bombas de óleo e os suportes de injetores são peças em alumínio. Sendo o ferro fundido de uma dureza bastante maior que o alumínio, a maquinação de coletores torna-se mais agressiva e exigente para a máquina, daí resultarem numerosas avarias nestas máquinas. Como tal, conclui-se que é necessário ter um plano de manutenção preventivo para estas máquinas também mais exigente do que para as restantes.

No geral, foram sugeridas intervenções preventivas espaçadas no máximo de 28 dias, e pelas razões mencionadas acima, pensa-se ser importante para o desempenho das últimas máquinas, que o plano de manutenção seja constituído apenas por intervenções preventivas de 7 ou 14 dias. Não largando a ideia de que, no final de um período experimental, devem ser refeitas todas as análises aqui apresentadas, e equacionar a relação fiabilidade-custos de manutenção.

4.5 Avaliação geral e sugestões

Apresentadas as análises e conclusões relativas a cada máquina GROB, é possível tirar algumas ilações sobre o funcionamento das mesmas, os planos de manutenção nelas aplicados, mostrar que algumas ideias sobre o comportamento das máquinas não são as mais corretas, apresentar ainda algumas outras sugestões relativas ao plano de manutenção, e ainda, apresentar algumas alusões à realização de trabalhos futuros que complementarão o trabalho aqui apresentado.

Durante o período de estágio, a estagiária procurou recolher informação sobre as máquinas alvo do estudo, com o objetivo de conseguir informação relevante para o mesmo e para futuras conclusões. Nesse período, a estagiária percebeu que as máquinas que parecem ter uma maior requisição de tempo de funcionamento são as máquinas que maquinam bombas de óleo.

Obteve também a informação de que, a ideia que alguns responsáveis da manutenção possuem sobre o funcionamento das máquinas GROB é que todas elas têm avarias em número e forma semelhantes, não destacam nenhuma máquina como sendo mais fiável e todas elas possuem um plano de manutenção preventivo idêntico. Este estudo veio mostrar que estas ideias podem ser contrariadas. Mostrou-se que as várias máquinas possuem distintos níveis de desempenho, que há casos em que existem muitas mais avarias do que noutros, e que as intervenções preventivas, embora na maior parte das vezes tenham um intervalo de dias entre elas múltiplo de 7, são aplicadas, em geral, de um modo desigual entre muitas máquinas. Como exemplo disto, temos as máquinas que maquinam bombas de óleo e as que maquinam coletores.

Foi notado também que, nos dados fornecidos pela Renault à estagiária, não existiam registos sobre os momentos em que se realizaram intervenções preventivas nas máquinas nº 2100 e nº 2118. Por este

motivo, não são apresentadas análises mais detalhadas para estas máquinas.

Aquando da análise dos dados, verificou-se que existem inúmeros casos em que são criadas duas ordens de trabalho (OT's) de caráter preventivo num mesmo dia. Quando a estagiária questionou um dos responsáveis da equipa de manutenção sobre este facto, este afirmou que tal podia acontecer por alguns motivos, e são eles:

- Existir a necessidade de ter técnicos diferentes na intervenção cujas disponibilidades sejam diferentes.
- O funcionamento da máquina ser necessário num determinado momento e, por isso, é adiada alguma tarefa preventiva que estava prevista.
- Não existir um custo fixo relativo à criação de uma ordem de trabalho deste tipo.

Perante as justificações apresentadas, a estagiária concluiu que:

- O nível de desempenho na máquina pode ser influenciado pelo técnico que intervém preventivamente em cada máquina, uma vez que não é sempre o mesmo a fazê-lo. No entanto, sugere que num trabalho futuro, se faça um estudo sobre o desempenho da máquina em função do(s) técnico(s) que operam cada máquina.
- Mesmo que se deseje que uma máquina esteja em funcionamento num determinado momento, os trabalhos a realizar numa prevenção devem ser consecutivos. Pois considera-se que, colocar uma máquina em funcionamento sem que sejam realizadas todas as tarefas previstas na manutenção preventiva, implicará um nível de desempenho mais reduzido uma vez que a máquina não se encontra nas devidas condições.
- Embora não haja um custo fixo na criação de uma ordem de trabalho preventiva, sugere-se evitar fazê-lo duas ou mais vezes

ao dia, uma vez que este procedimento implica uma maior perda de tempo e, portanto, de produção também.

Pelas análises realizadas neste último capítulo, é possível também afirmar que as máquinas que maquinam coletores são as que correspondem a curvas ajustadas que mais se afastam do esperado e que, a trajetória que lhe está associada indicia, em quase todos os casos, que existem poucas intervenções preventivas comparativamente com o número de intervenções corretivas com prioridade zero.

Para trabalho futuro recomenda-se analisar as trajetórias de um novo processo estocástico definido pela razão entre o número de paragens da máquina para intervenções preventivas até ao instante t e o número de intervenções na máquina para a realização de intervenções preventivas e de intervenções corretivas de qualquer prioridade até ao instante t . Ou seja, o novo processo será da forma:

$$S(t) = \frac{X(t)}{X(t) + Z(t)}, t \in \mathbb{N}_0,$$

onde $X(t) = n^\circ$ de intervenções preventivas até ao instante t e $Z(t) = n^\circ$ de intervenções corretivas de qualquer prioridade até ao instante t . Deste modo, será possível analisar a percentagem de vezes em que uma máquina tem recebido intervenções de carácter preventivo e corretivo. Estes dados podem ser informativos sobre a influência das intervenções preventivas na totalidade das intervenções corretivas.

É possível também afirmar que o tipo de peça a ser maquinada parece assumir igualmente o papel de variável explicativa para o nível de desempenho das máquinas analisadas. Isto porque se verificou que para máquinas que maquinam coletores, há uma maior tendência para que ocorram avarias e que, por exemplo, em geral, máquinas que maquinam bombas de óleo apresentam um nível de desempenho mais elevado do que as restantes. Por este motivo, deixa-se aqui uma outra

sugestão que consiste na avaliação da relação entre o nível de desempenho de uma máquina com a peça que esta máquina.

Pensa-se que é necessário também, alertar para que haja uma especial atenção sobre o plano preventivo das máquinas que apresentam elevados valores do processo $R(t)$ e que, ao mesmo tempo, manifestem um elevado número de avarias. Concluiu-se que, elevados valores para o processo apresentado, significavam que o número de intervenções preventivas era bastante superior ao número de intervenções corretivas de prioridade zero. Então, máquinas com um grande número de avarias e um número superior a esse de intervenções preventivas, implicam um custo acrescido no que diz respeito à sua manutenção. São exemplos deste caso as máquinas nº 2249, nº 2113, nº 2223 e nº 2119, sendo que as três últimas maquinam bombas de óleo.

Uma outra sugestão apresentada para estudos futuros, é a comparação dos resultados aqui obtidos com os valores do $MTTF$, $MTBM$ e da taxa de falhas futuramente calculados para cada uma das máquinas. Assim, é possível ter uma melhor percepção da diferença do nível de desempenho entre as várias máquinas.

Perante todas as análises apresentadas e suas conclusões, é possível afirmar que existe relação entre o plano de manutenção preventivo numa máquina e a sua fiabilidade, aqui analisada em termos do tempo sem intervenção. No entanto, o plano de manutenção preventivo não é uma variável exclusiva na explicação da fiabilidade de uma máquina. Podem existir outras variáveis com o mesmo efeito, como por exemplo, o tempo em que a máquina está a trabalhar consecutivamente, o tipo de peça maquinado pela máquina, o indivíduo que opera a máquina e o(s) que lhe faz(em) intervenções de manutenção, entre outros. A influência destas e de outras possíveis variáveis no nível de desempenho de uma máquina devem também, futuramente, ser estudadas.

No presente trabalho é possível concluir que, o plano de manutenção preventivo e o tipo de peça maquinado são variáveis de forte interferência na fiabilidade de uma máquina.

4.6 Considerações finais

A realização deste estágio na empresa Renault C.A.C.I.A. foi de elevada importância para o desenvolvimento pessoal e intelectual da estagiária. Foi assim possível conhecer o ambiente empresarial e formas de funcionamento de uma empresa bem estruturada como a Renault C.A.C.I.A.

Este estágio permitiu adquirir conhecimentos a nível organizacional. Originou também o conhecimento de uma matéria nunca antes estudada ao longo do percurso académico, o que se torna numa mais valia para a estagiária.

A integração da estagiária na empresa foi bastante facilitada pela boa disposição e disponibilidade dos vários elementos da empresa, principalmente da equipa do departamento de componentes motores que sempre manifestaram respeito e cooperação na realização deste trabalho.

O tema proposto é de elevada importância para o desenvolvimento da produção na indústria. É necessário que a empresa disponha de equipamentos operacionais e no seu melhor nível de desempenho para que se mantenha nos lugares cimeiros da produção de qualidade e assim se manter competitiva com outras grandes empresas do mesmo setor industrial.

A tarefa proposta, de verificar efeitos do plano de manutenção preventivo sobre a fiabilidade de um equipamento foi uma tarefa desafiante e fez levantar muitas outras questões que podem e devem ser exploradas. Este trabalho representa a primeira análise estatística realizada sobre a fiabilidade das máquinas GROB da Renault C.A.C.I.A.. Várias sugestões de trabalho futuro são aqui deixadas e outras podem daqui resultar para complementar e melhorar a análise da fiabilidade dos equipamentos.

Bibliografia e Webgrafia

Assis, R. (2004). *Apoio à decisão em gestão da manutenção*. (Lidel, Ed.). Lisboa.

Casaca, J. M. (2003). *A modelação estocástica da fiabilidade*. (LNEC, Ed.). Lisboa.

Cleveland, W. S. (1979). Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 74, pp. 829-836.

Cleveland, W. S., Devlin, S. J. (1988). Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 403, pp. 596-610.

Everitt, B., Hothorn, T. (2010). A handbook of statistical analysis using R, 2nd ed. (CRC Press, Ed.). Boca Raton.

Filipe, F. (2006). *Gestão e organização da manutenção, de equipamento de conservação e manutenção de infra-estruturas ferroviárias*. Tese de Mestrado. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Porto.

Guimarães, R., Cabral, J. A. (2007). *Estatística*, 2ª ed. (McGraw-Hill, Ed.). Madrid.

Hastie, T., Tibshirani, R. (1990). *Generalized Additive Models*. London.

Lingeron, J.-C. (1979). *La fiabilité en mécanique*. (DESFORGES, Ed.). Paris.

Loader, C. (1999). *Local Regression and Likelihood*. (Springer-Verlag, Ed.). New York.

Marquetti, A., Viali, L. (2004). Principios e aplicações de regressão local. *Análise Económica*, 42, pp. 253-277.

Pallerosi, C. A. (2008). Confiabilidade Humana: nova metodologia de análise qualitativa e quantitativa. *6º Simpósio Internacional de Confiabilidade*, Florianópolis, Brasil.

Pina e Cunha, M., Rego, A., Campos e Cunha, R., & Cardoso, C. (2007). *Manual de comportamento organizacional e gestão*. (RH, Ed.). Lisboa.

Serrano, E. (2009). *Conceito, Classificação e Quantificação da Fiabilidade Humana na Relação Homem-Máquina*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica. Lisboa.

Site da Renault C.A.C.I.A. (2013). Obtido de <http://www.renault.pt/descubra-a-renault/cacia>. Visitado em maio de 2013.

Stephens, M. A. (1974). EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons. *Journal of the American Statistical Association*, 69, pp. 730-737.

Anexos

Anexo I: Script da aplicação do método de Validação Cruzada para a escolha do parâmetro de suavização

```
R C:\Users\Maria\Desktop\Estágio\2227\Lowess.R - R Editor
## ESCOLHA DO PARÂMETRO DE LOCALIZAÇÃO USANDO VALIDAÇÃO CRUZADA ##

#indicação da localização dos dados
setwd("C:\\Users\\Maria\\Desktop\\Estágio\\2227")

#leitura do dados
data<-read.table("TMP_S_INTERV.txt",header=T)

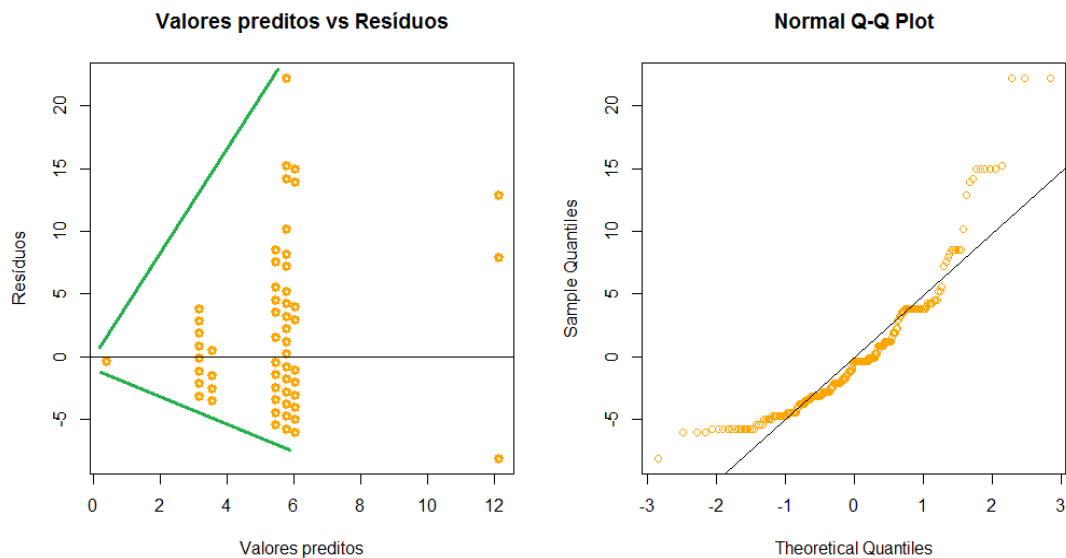
dd<-data
#ordenação do conjunto de dados em ordem a x
dd<-dd[order(dd$x),]

#método de validação cruzada
Fit<-data.frame(span=seq(0.05,1,0.05))
Fit$SSE<-rep(NA,nrow(Fit))
Fit$PRESS<-rep(NA,nrow(Fit))

for(i in 1:nrow(Fit)){
  span<-Fit$span[i]
  fit<-loess(z~x,dd,span=Fit$span[i],degree=1)
  SSE<-sum((dd$z-predict(fit))[-c(1,nrow(dd))]^2)
  press<-0
  for(obs in 2:(nrow(dd)-1)){
    fit<-loess(z~x,dd,span=span,degree=1,subset=-obs)
    pred<-predict(fit,newdata=dd[obs,])
    press<-press+(dd[obs,'z']-pred)^2
  }
  Fit$SSE[i]<-SSE
  Fit$PRESS[i]<-press
}
Fit
#auxilio gráfico para a escolha do parâmetro de localização
with(Fit,matplot(span,cbind(PRESS,SSE),type='l'))
```

Anexo II: Gráfico de resíduos e qqnorm para o ajustamento da curva loess à máquina nº 2102 e comandos para as suas construções.

```
par(mfrow=c(1,2))
a<-fitted(fit)
t<-resid(fit)
plot(a,t,main="Valores preditos vs Resíduos", ylab="Resíduos",
xlab="Valores preditos",pch=1, lwd=3, col="orange")
qqnorm(t,col="orange")
qqline(t,lwd=2)
```



```
> shapiro.test(t)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  t
W = 0.857, p-value = 1.449e-13

> ad.test(t)

      Anderson-Darling normality test

data:  t
A = 7.5681, p-value < 2.2e-16
```

Anexo III: Script usado para a construção da curva loess para a máquina nº 2102.

```
setwd("C:\\Users\\Maria\\Desktop\\Estágio\\2102")

data<-read.table("TMP_S_INTERV.txt",header=T)

dd<-data
dd<-dd[order(dd$x),] #ordena o conj de dados em ordem a x

Fit<-data.frame(span=seq(0.05,1,0.05))
Fit$SSE<-rep(NA,nrow(Fit))
Fit$PRESS<-rep(NA,nrow(Fit))

for(i in 1:nrow(Fit)){
  span<-Fit$span[i]
  fit<-loess(z~x,dd,span=Fit$span[i],degree=1)
  SSE<-sum((dd$z-predict(fit))[-c(1,nrow(dd))]^2)
  press<-0
  for(obs in 2:(nrow(dd)-1)){
    fit<-loess(z~x,dd,span=span,degree=1,subset=-obs)
    pred<-predict(fit,newdata=dd[obs,])
    press<-press+(dd[obs,'z']-pred)^2
  }
  Fit$SSE[i]<-SSE
  Fit$PRESS[i]<-press
}
Fit
with(Fit,matplot(span,cbind(PRESS,SSE),type='l'))

t<-seq(0,100,1)
y<-seq(0,100,1)

plot(z~x,dd,main="Curva Loess",ylab="Tempo sem intervenções (dias)",xlab="Tempo entre preventivas (dias)",lwd=2,col=4)
fit<-loess(z~x,dd,span=0.65,degree=1)
lines(predict(fit)~x,dd,lwd=2,col=2)
lines(t,y,type="l",lwd=2,col="grey")
```


Anexo IV: Scripts usados para a obtenção dos gráficos de barras para a máquina nº 2102.

```
setwd("C:\\Users\\Maria\\Desktop\\Estágio\\2102")

data<-read.table("TBC.txt",header=T)

x<-data$TBC
valores<-factor(cut(x,breaks=c(1*-1:10)))
xout<-as.data.frame(table(valores))
xout<-transform(xout,cumFreq=cumsum(Freq),relative=prop.table(Freq))
xout

tec<-c(0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)
freq<-c(25,24,14,9,8,4,5,7,2,3,3)

barplot(freq,names.arg=tec,main="Gráfico de barras do Tempo entre Corretivas",
        ylab="Frequência",xlab="Tempo (dias)",ylim=c(0,30),col="orange")
```

```
setwd("C:\\Users\\Maria\\Desktop\\Estágio\\2102")

data<-read.table("TBP.txt",header=T)

x<-data$TBP
length(x)
valores<-factor(cut(x,breaks=c(1*-1:50)))
xout<-as.data.frame(table(valores))
xout<-transform(xout,cumFreq=cumsum(Freq),relative=prop.table(Freq))
xout

tec<-c(0,7,14,21,28,49)
freq<-c(19,33,14,8,15,1)

barplot(freq,names.arg=tec,main="Gráfico de barras do Tempo entre Preventivas",
        ylab="Frequência",xlab="Tempo (dias)",ylim=c(0,40),col="orange")
```

Nota: Os gráficos de barras construídos com base neste script determinam que no eixo *Ox* os valores não estejam numa escala numérica. São tomados como atributos.

Anexo V: Script usado para a construção do gráfico da trajetória do processo $R(t)$ para a máquina nº 2102.

```
setwd("C:\\Users\\Maria\\Desktop\\Estágio\\2102")

data<-read.table("NovoRacio.txt",header=T)

x<-data[-(1:150),]
plot(x,ylim=c(0,1),xlim=c(0,100),col=4,lwd=3,
main="Trajetória do processo  $r(t)$ ", ylab="Razão", xlab="Nº de preventivas por unidade de tempo")

plot(data,ylim=c(0,1),xlim=c(0,100),col=4,lwd=3,
main="Trajetória do processo  $r(t)$ ", ylab="Razão", xlab="Nº de preventivas por unidade de tempo")

ajuste<-lm(r~xt,data=x)
abline(ajuste,col="red", lwd=2)
```

Anexo VI: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2112.

Gráfico de barras do Tempo entre Corretivas

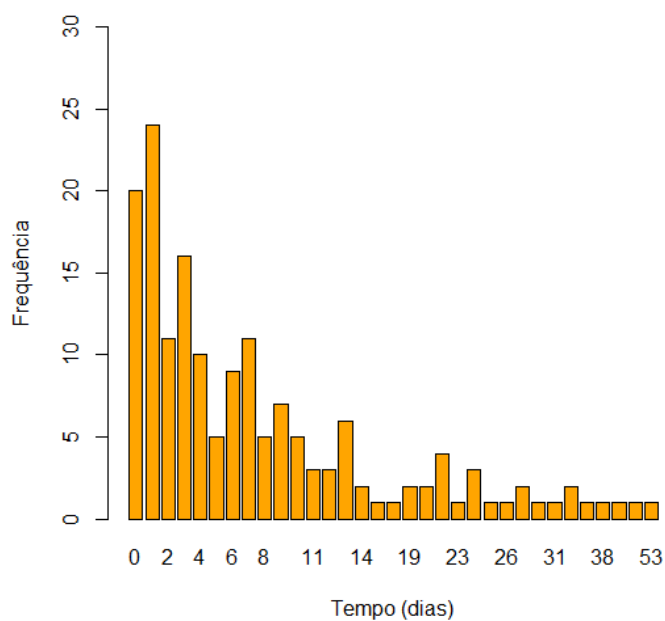
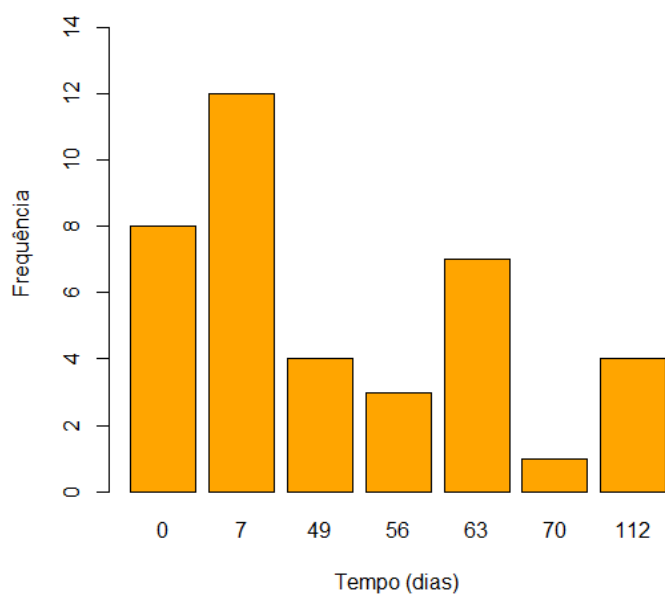


Gráfico de barras do Tempo entre Preventivas



Anexo VII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2113

Gráfico de barras do Tempo entre Preventivas

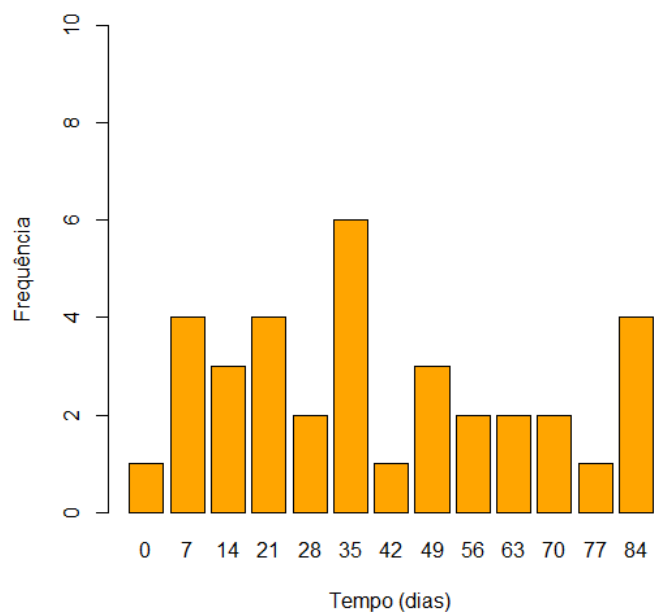
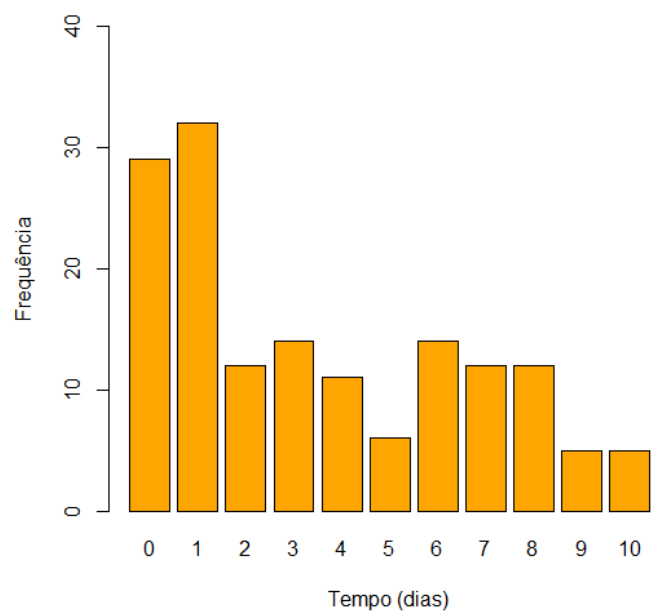


Gráfico de barras do Tempo entre Corretivas



Anexo VIII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2115

Gráfico de barras do Tempo entre Corretivas

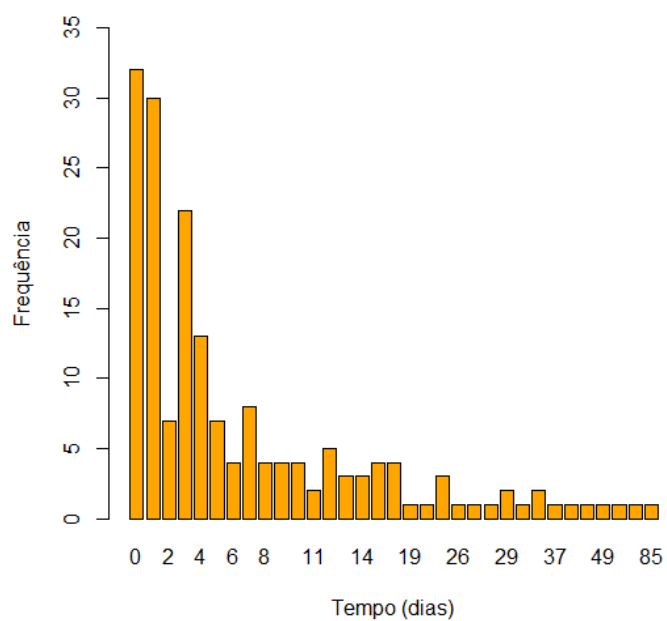
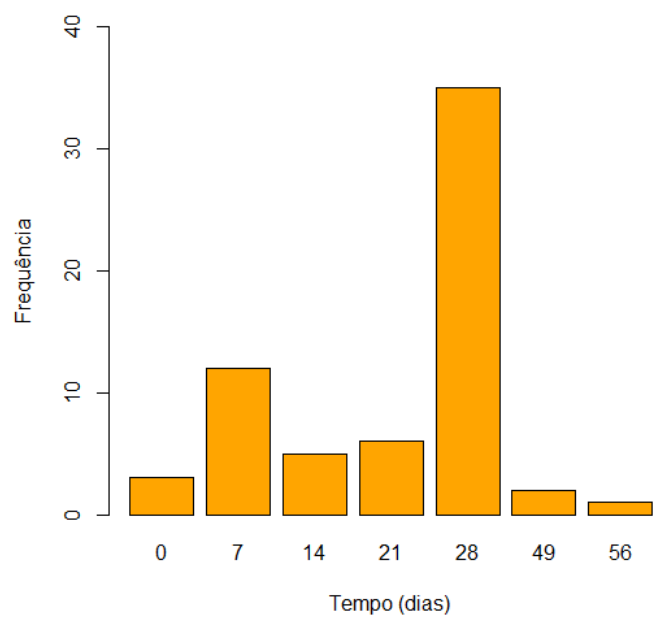


Gráfico de barras do Tempo entre Preventivas



Anexo IX: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2119

Gráfico de barras do Tempo entre Corretivas

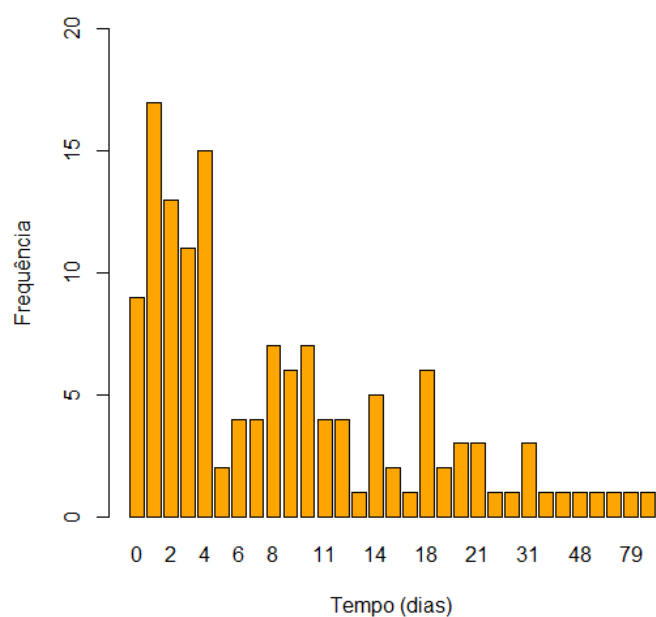
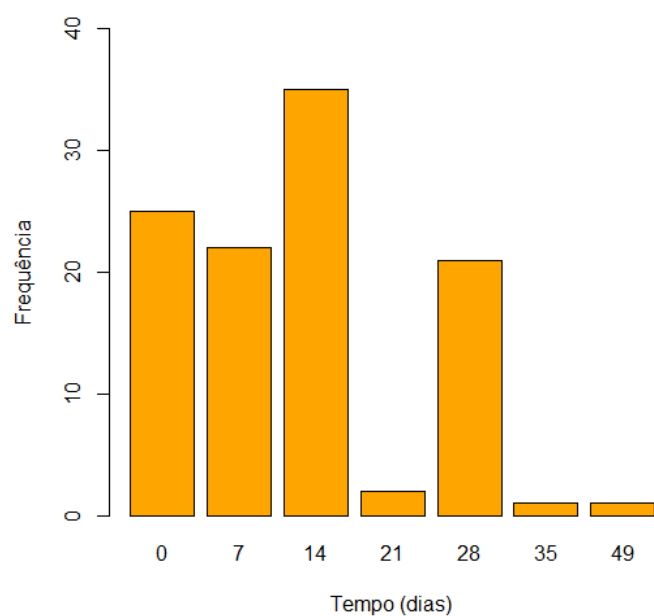


Gráfico de barras do Tempo entre Preventivas



Anexo X: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2223

Gráfico de barras do Tempo entre Corretivas

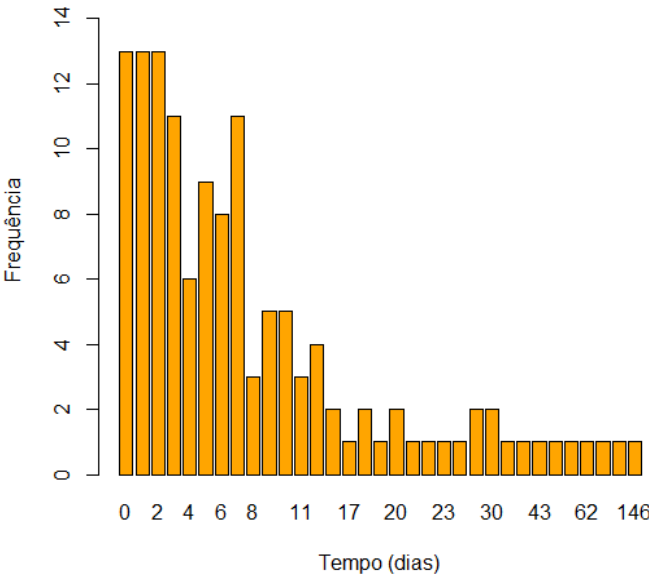
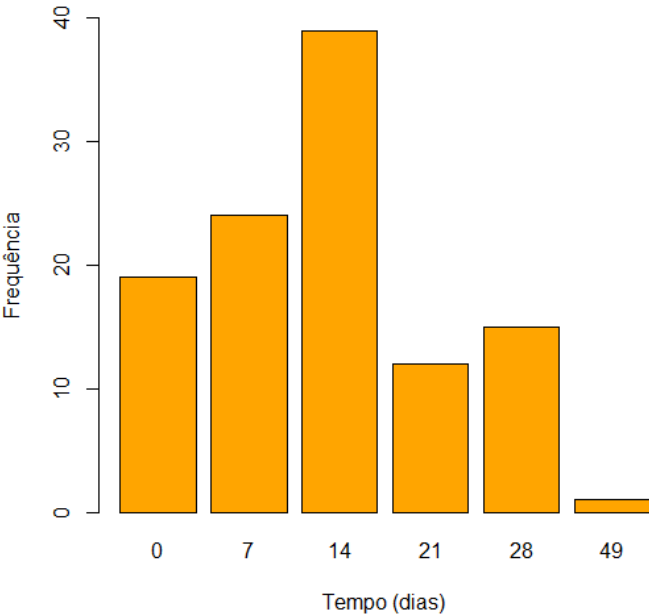
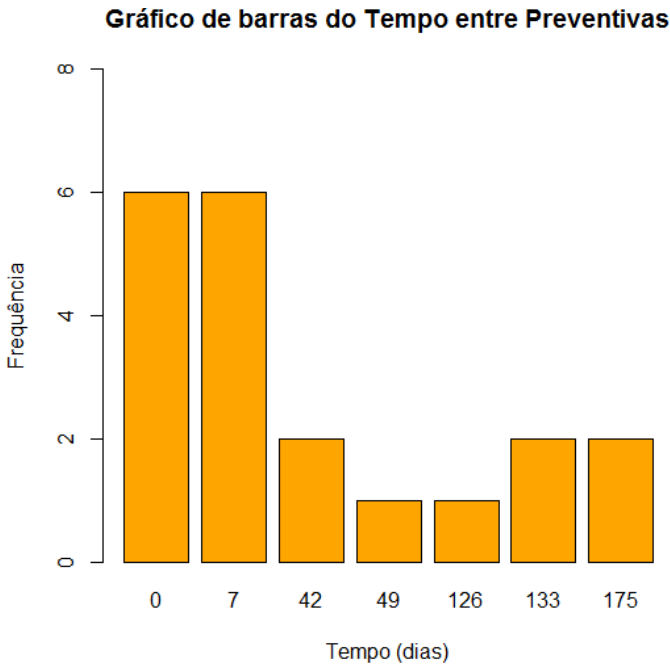
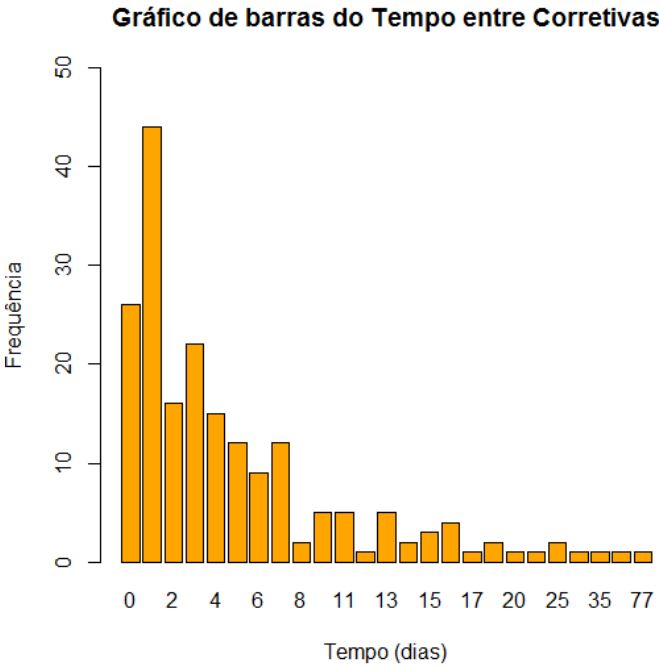


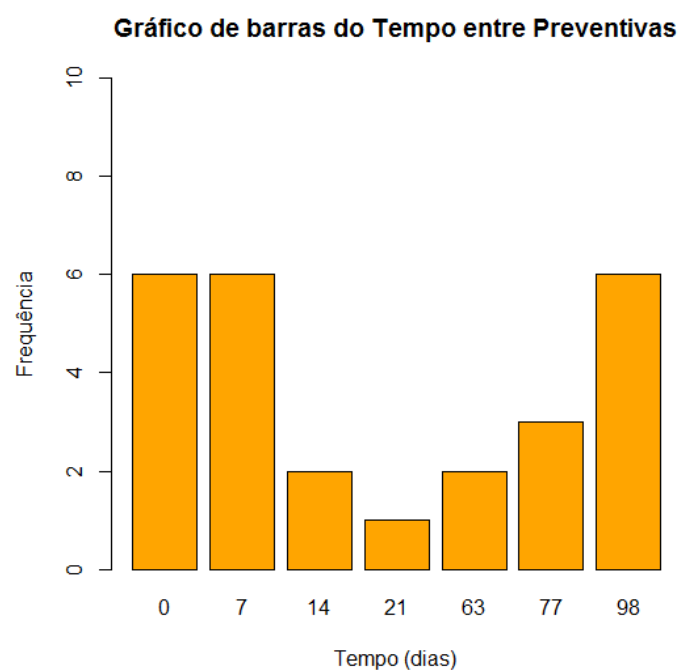
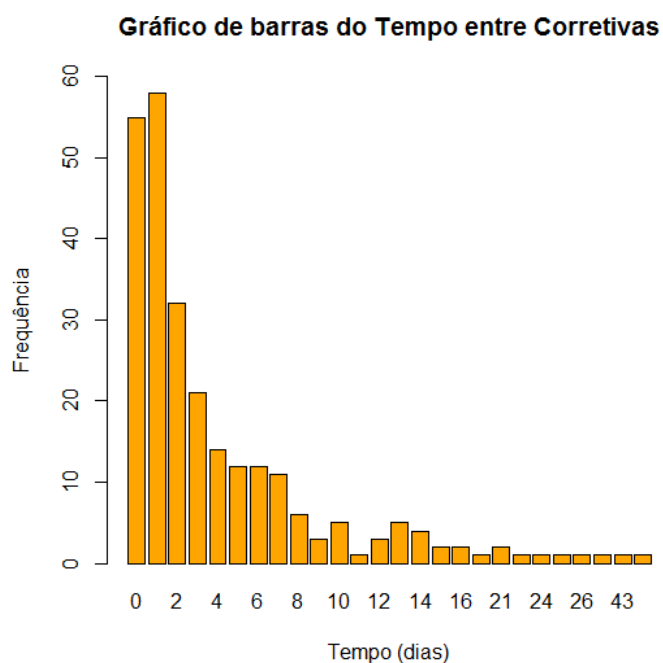
Gráfico de barras do Tempo entre Preventivas



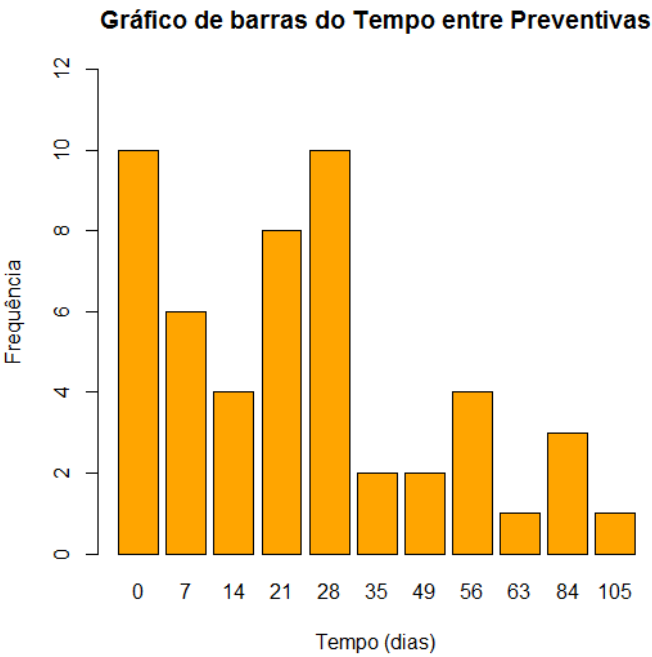
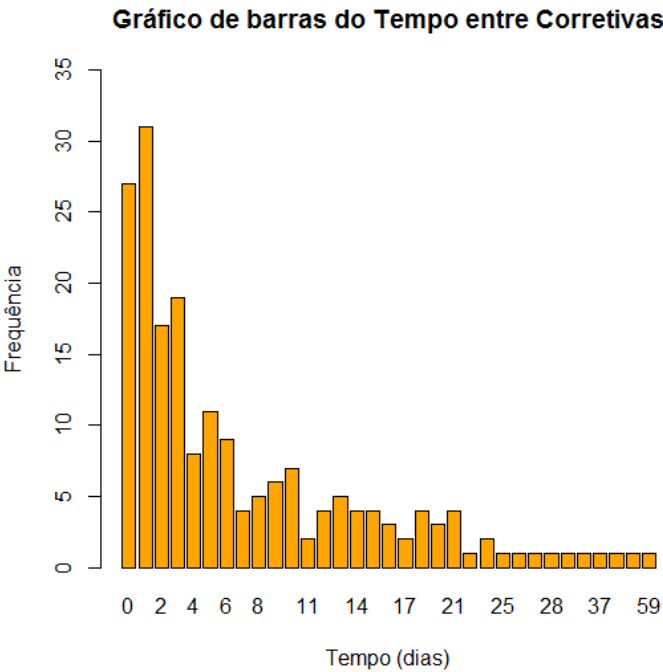
Anexo XI: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2101



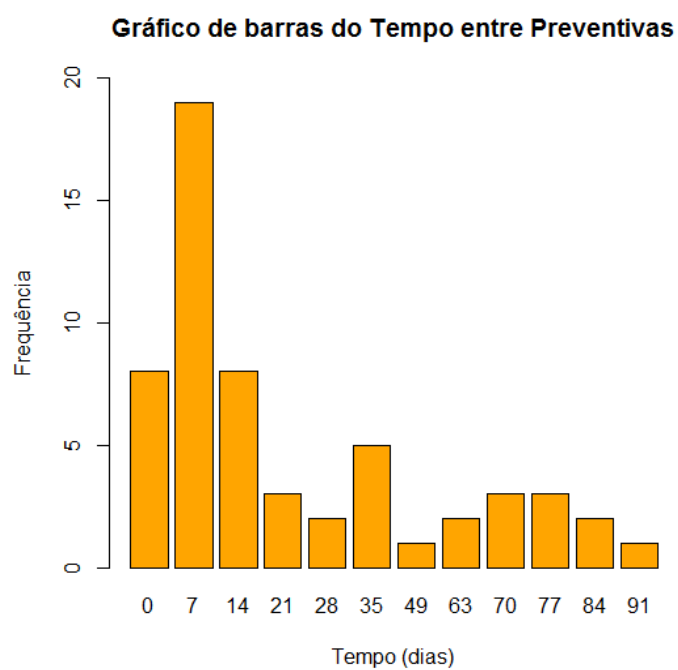
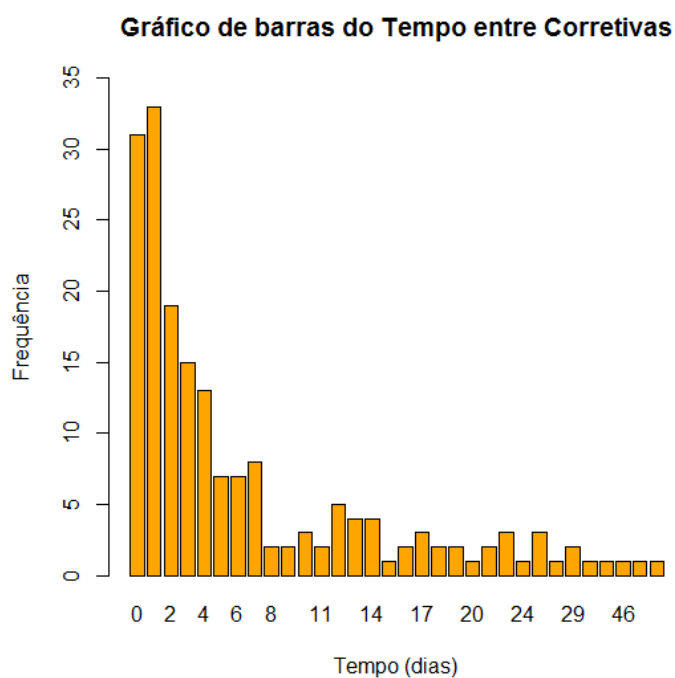
Anexo XII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2114.



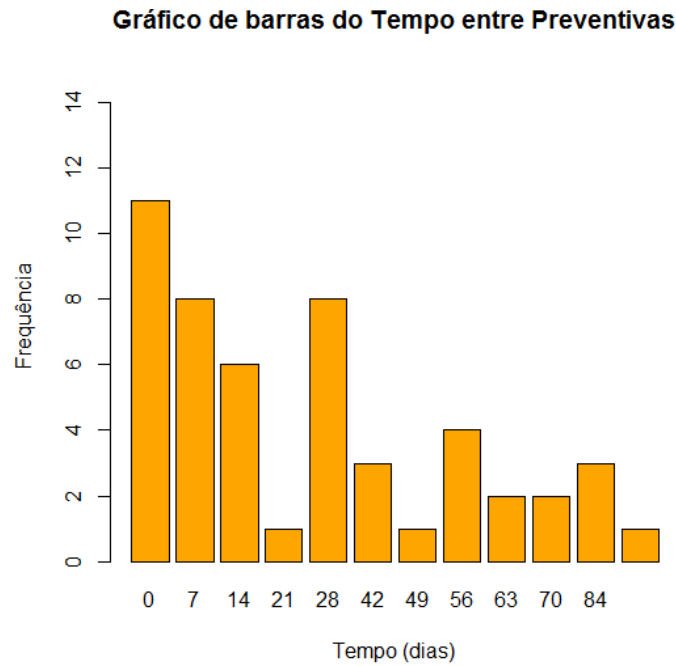
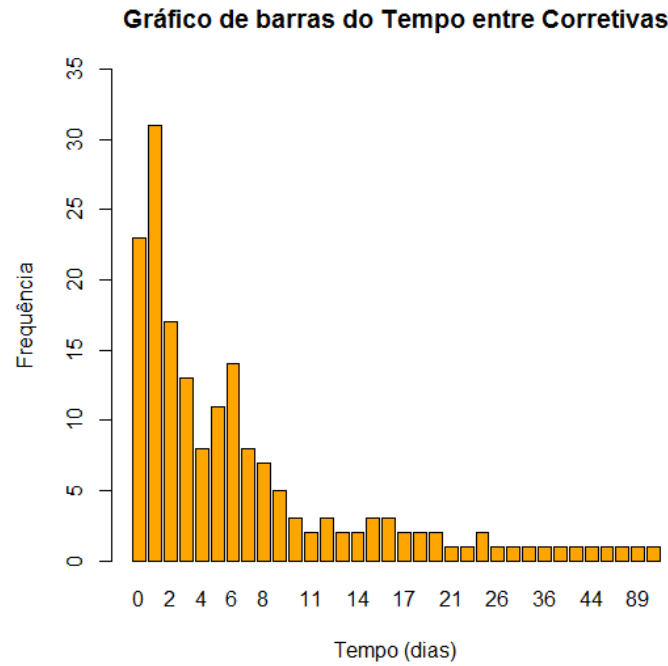
Anexo XIII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2249



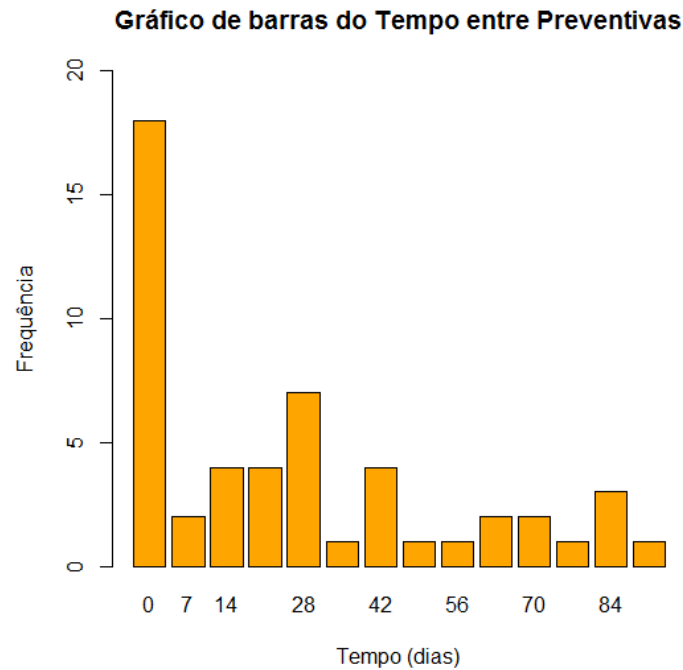
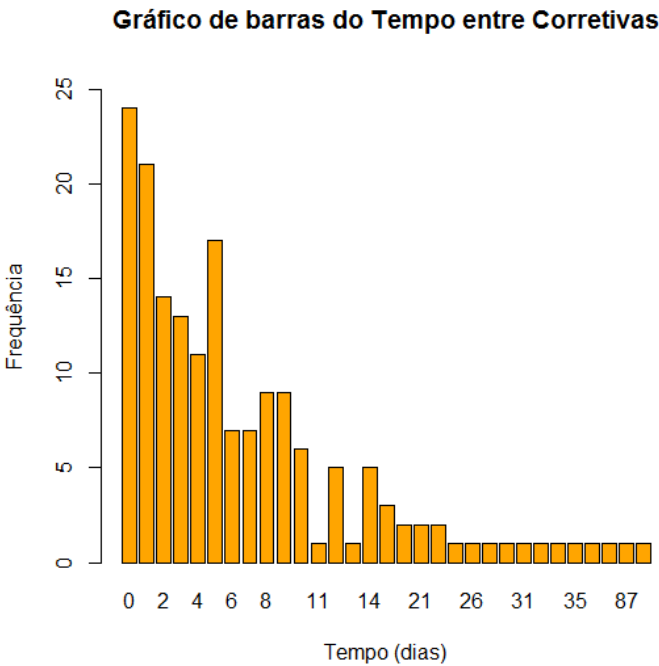
Anexo XIV: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2219



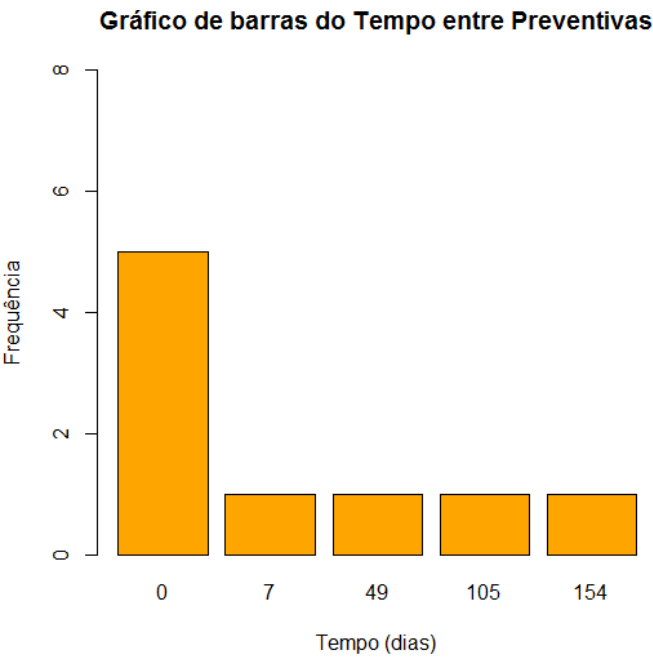
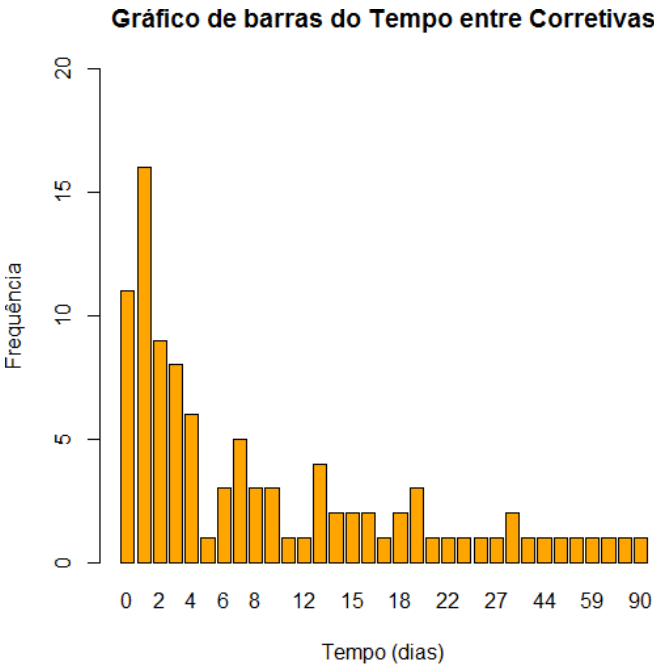
Anexo XV: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2220



Anexo XVI: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2250



Anexo XVII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2116



Anexo XVIII: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2222

Gráfico de barras do Tempo entre Corretivas

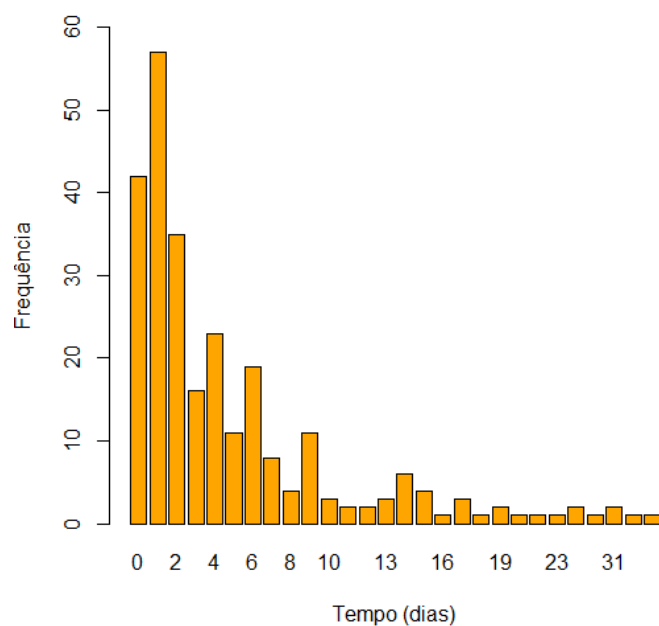
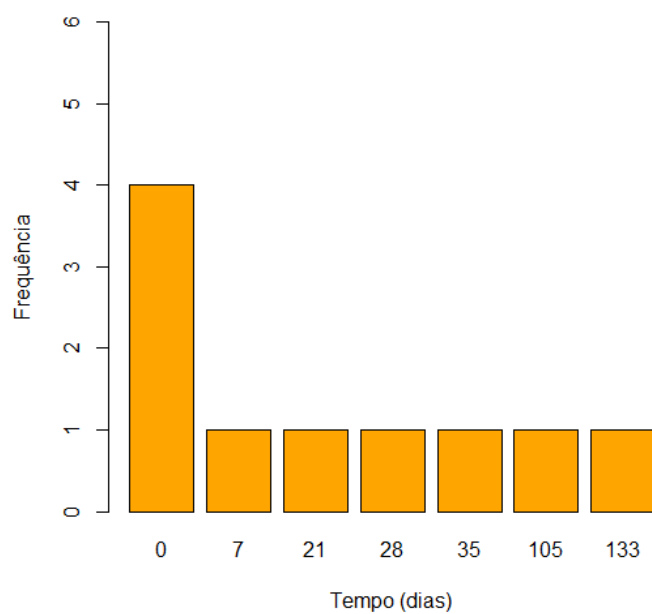


Gráfico de barras do Tempo entre Preventivas



Anexo XIX: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2221

Gráfico de barras do Tempo entre Corretivas

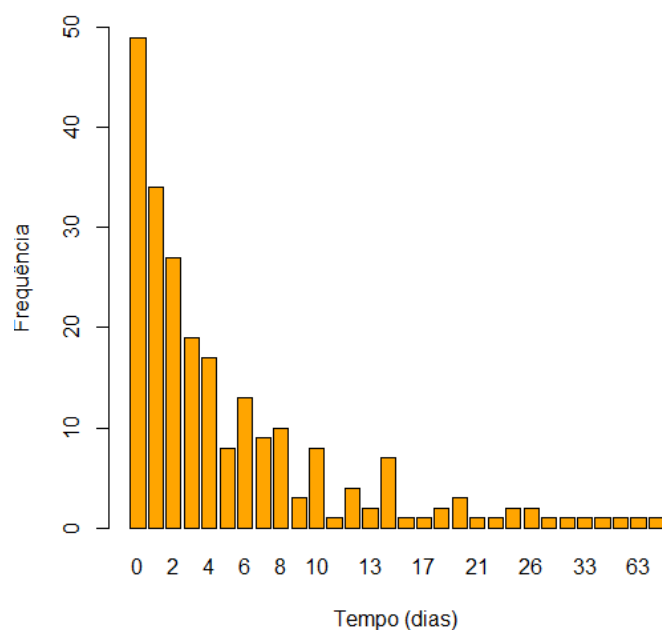
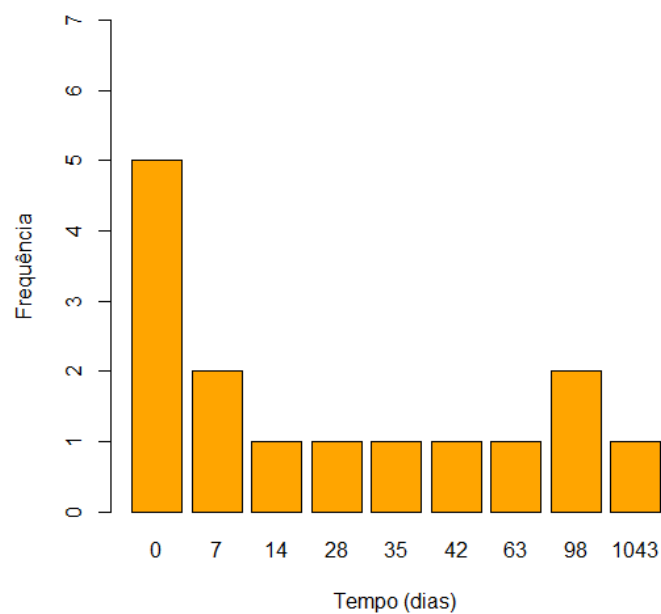
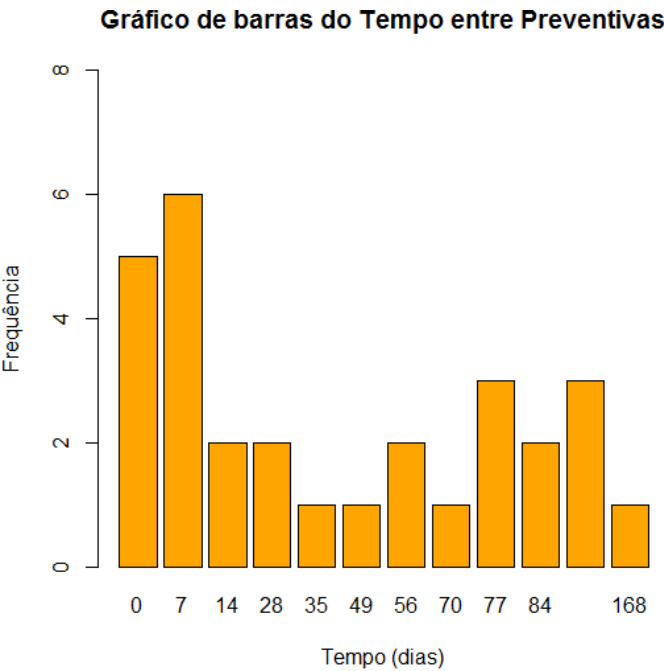
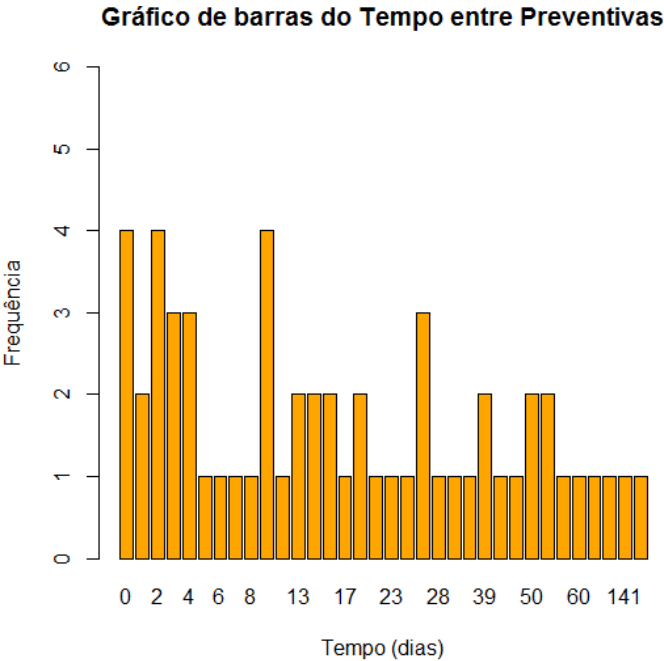


Gráfico de barras do Tempo entre Preventivas



Anexo XX: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2227



Anexo XXI: Gráficos de barras do tempo entre corretivas e do tempo entre preventivas para a máquina nº 2117

